

# Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica



**Politecnico  
di Torino**

Tesi di Laurea Magistrale

## **Analisi delle potenzialità delle simulazioni acustiche ibride wave-based + raytracing**

Relatrice  
Prof.ssa Arianna Astolfi

Correlatrice  
Prof.ssa Louena Shtrepi

Candidato

Luca Gamba

Matricola 303001

A.A. 2023/2024



# Sommario

1.	Abstract.....	5
2.	L'acustica delle sale .....	7
2.1	Un po' di storia: dal teatro all'aperto fino ai giorni nostri .....	7
2.2	Le qualità acustiche proposte da Beranek .....	10
2.3	Le problematiche di una sala musicale.....	12
2.4	Il comportamento ideale di una sala: isotropia, omogeneità e il fenomeno dell'interferenza.....	13
2.5	Nuovo approccio all'acustica delle sale .....	14
2.6	I descrittori acustici principali .....	17
2.7	Spazio oggettivo e soggettivo di una sala.....	22
2.8	Effetti delle onde dirette e delle riflessioni .....	23
2.9	Regole di progettazione.....	25
2.10	I CAD acustici.....	25
3.	I software utilizzati: Treble e Ramsete .....	29
3.1	Treble .....	29
3.2	Ramsete.....	33
4.	Descrizione del caso studio.....	36
5.	La forma della sala: analisi della pianta e sezione.....	38
6.	Costruzione modello CAD rappresentativo dell'ambiente .....	40
7.	Prime stime mediante acustica geometrica .....	41
7.1	Visibilità.....	41
7.2	Riflettori acustici .....	42
8.	Simulazione ambiente non trattato e individuazione delle criticità.....	44
9.	Analisi dei materiali e il loro posizionamento .....	48
9.1	INTONACO FONOASSORBENTE.....	48
9.2	TRATTAMENTO FONOASSORBENTE SOFFITTO .....	50
9.3	PARETI DIFFONDENTI (INTONACO) .....	51
9.4	PORTE INTERNE.....	52
9.5	TENDAGGIO IN TESSUTO DRAPPEGGIATO .....	53
9.6	PAVIMENTAZIONE IN MOQUETTE.....	53
10.	Simulazione ambiente trattato e risultati ottenuti .....	55

11.	Confronto tra le simulazioni di Treble e Ramsete nel teatro.....	58
11.1	Calcolo dei parametri acustici.....	61
11.2	Calcolo delle risposte in frequenza .....	64
12.	Confronto tra le simulazioni di Treble e Ramsete e i dati misurati in un ambiente reale.....	67
12.1	Calcolo dei parametri acustici.....	71
12.2	Calcolo risposte in frequenza.....	74
13.	Test soggettivi in ASL.....	77
14.	Conclusioni .....	90
	Bibliografia.....	93

## 1. Abstract

La presente tesi di laurea ha come oggetto la progettazione acustica di un teatro mediante un software di simulazione ibrida wave-based + ray-tracing e l'analisi delle potenzialità di questo strumento software per applicazioni nell'ambito dell'acustica architettonica.

L'ambiente in esame ha una superficie di circa 1100 m<sup>2</sup> e un volume di circa 6300 m<sup>3</sup>; nel momento in cui viene scritto questo documento è ancora in fase di progetto e non è ancora edificato. La struttura sorgerà nella città di Mantova e sarà destinata prevalentemente alla riproduzione di musica, in particolare musica jazz. Si tratta di un caso studio che ha pochi precedenti in letteratura poiché solitamente locali di questo tipo hanno dimensioni ridotte e una struttura interna molto più simile a quella di un edificio adibito alla ristorazione che a quella di un teatro.

Partendo dagli elaborati architettonici è stato ricreato innanzitutto un modello CAD dell'ambiente, dopodiché sono state effettuate delle prime simulazioni sull'ambiente privo di trattamenti acustici, per valutare le problematiche e stimare gli interventi. Come software di simulazione in fase di progetto acustico è stato utilizzato Treble, che come già detto implementa un modello di calcolo ibrido: wave-based per le basse frequenze e ray-tracing per le alte frequenze. Treble è un software recente e ancora in evoluzione, ma la sua metodologia di calcolo oltre ad alcune sue funzionalità lo rendono estremamente interessante rispetto alle alternative presenti sul mercato. Durante il lavoro di progettazione acustica del teatro il software è stato utilizzato ampiamente per la valutazione degli interventi e la scelta dei materiali, sia analizzando i descrittori acustici che effettuando l'auralizzazione dell'ambiente. Per analizzare le peculiarità di Treble e del modello di calcolo ibrido è stato effettuato un confronto con un altro software commerciale, Ramsete. Quest'ultimo implementa un modello di calcolo di pyramid-tracing che simula il comportamento delle onde sonore tracciando fasci divergenti di forma piramidale. Per effettuare il confronto inizialmente è stato considerato come caso studio il teatro, rapportando i

valori dei descrittori acustici calcolati dai due software. Successivamente è stato effettuato un ulteriore confronto partendo da un altro ambiente di dimensioni ridotte: l'aula 1T del Politecnico di Torino. In questo caso studio è stato possibile confrontare i risultati ottenuti con le simulazioni di Treble e Ramsete con quelli ottenuti mediante delle misure in loco.

Oltre all'analisi dei descrittori acustici, per valutare le differenze tra i due software e tra i software stessi e le misurazioni, si è scelto di condurre anche un'indagine sulle differenze percepite a livello uditivo. Sfruttando la possibilità di auralizzare le diverse risposte all'impulso, sono stati condotti dei test soggettivi di ascolto in cui i partecipanti sono stati chiamati a identificare in termini qualitativi le differenze e la resa sonora dei campioni presentati. Questi campioni sono stati ottenuti auralizzando le risposte all'impulso generate sia dai programmi di simulazione sia dalle misurazioni, nei due diversi casi studio.

Il test proposto è il two interval, two alternative forced choice test (2I/2AFC) ed è stato effettuato nell'Audio Space Lab del Politecnico di Torino con un sistema di ascolto ambisonico del terzo ordine. La scelta di auralizzare gli ambienti nel formato ambisonico del terzo ordine ha l'ulteriore scopo di valutare l'immersività di questa tipologia di ascolto e l'efficacia del suo utilizzo per quanto riguarda l'auralizzazione di ambienti simulati.

## 2. L'acustica delle sale

### 2.1 Un po' di storia: dal teatro all'aperto fino ai giorni nostri

Lo studio dell'acustica delle sale teatrali è una conquista recente nell'ambito della tecnica delle costruzioni. Fin dall'antica Grecia, i luoghi adibiti allo spettacolo erano quasi sempre all'aperto e, per questo motivo, non erano influenzati dai problemi legati alle riflessioni acustiche delle pareti, come invece accade nei teatri chiusi.

Per molti secoli la costruzione dei teatri si è basata sull'idea che le onde sonore si propagassero in modo circolare. Questa teoria sta alla base della costruzione dei teatri greci di tipo a ventaglio e dei teatri romani a forma ellittica. Secondo questa teoria le onde si propagano "come le onde in uno stagno ma si spostano anche in altezza e non solamente sul piano", come riportato in Figura 1.

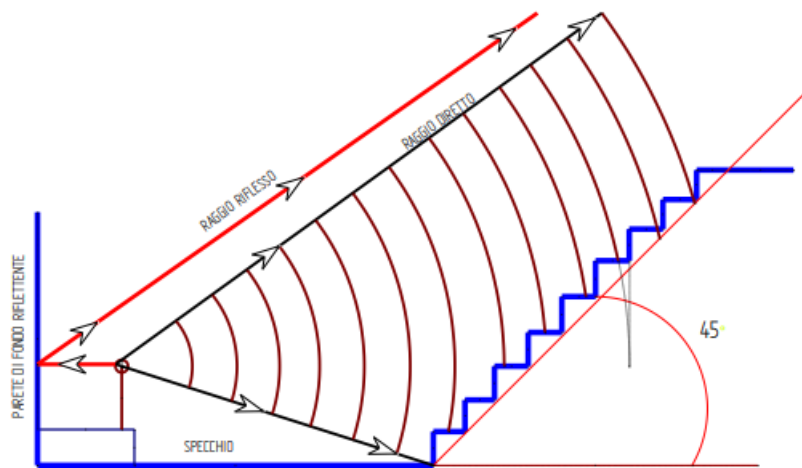


Figura 1 – Propagazione delle onde acustiche in un teatro all'aperto (1)

I primi teatri avevano come unico criterio di progettazione la visibilità e venivano costruiti con l'idea che, se la percezione visiva dello spettatore era buona, allora ugualmente era garantita anche una buona percezione acustica. Secondo questo principio, tutti i teatri presentavano una forma ad arco di circonferenza con i posti a sedere disposti su gradinate, come mostrato in figura 2.



*Figura 2 – Teatro greco di Siracusa (1)*

Un punto di svolta nella storia dell'architettura dei teatri si ha a partire dal XVII secolo, quando i teatri diventano luoghi di aggregazione per la classe nobiliare. In questo contesto il teatro è soprattutto luogo di ostentazione della ricchezza e di socialità, più che luogo adibito all'ascolto di musica; pertanto, l'acustica dell'ambiente non ha un ruolo fondamentale e non è l'elemento che guida la progettazione architettonica.



*Figura 3 – Dipinto del Canaletto della Rotunda di Ranelagh Garden (1)*



Il teatro per come viene immaginato oggi, cioè come luogo destinato alla rappresentazione musicale o teatrale, fa la sua comparsa nella seconda metà del Settecento. Fu Mozart che fece installare per primo delle poltrone nella sala e solo successivamente, a partire dall' Ottocento, si diffuse l'idea di avere rappresentazioni musicali all'interno dei teatri. In questo periodo si diffondono teatri a forma di parallelepipedo o del tipo "a campana".



*Figura 4 – Musikverein di Vienna (1)*

Rispetto a quelle dell'Ottocento, le moderne sale teatrali presentano un grande passo in avanti, sia per quanto riguarda la complessità architettonica, sia per il contenuto tecnico-scientifico. La presenza di numerose superfici riflettenti, sulle pareti come sul soffitto, fa sì che si generino le riflessioni dette "immediate" (entro i 10-15 ms dall'onda diretta), che vengono percepite del nostro cervello come rafforzamento dell'ascolto. Il posizionamento mirato e la tipologia di materiali

fonoassorbenti garantiscono la riduzione e il controllo delle problematiche acustiche che possono insorgere in una sala.



*Figura 5 – Roy Thompson Hall Toronto (1)*

## 2.2 Le qualità acustiche proposte da Beranek

L. Beranek descrisse nel 1954 una serie di “qualità acustiche” con le quali valutare la percezione acustica dei teatri. Queste sono dei parametri soggettivi, definibili mediante giudizi di esperti e costituiscono uno strumento utile per guidare la progettazione di nuove sale. Le qualità proposte da Beranek sono:

- la **vivezza** o **pienezza** dei toni legata al tempo di riverberazione a media frequenza;

- la **chiarezza** o definizione che definisce la capacità di distinguere suoni che si susseguono nel tempo e che dipende in modo inverso dal tempo di riverberazione;
- l'**intimità** o presenza che fornisce all'ascoltatore la sensazione delle dimensioni spaziali della sala e che dipende dal ritardo fra l'onda diretta e la prima riflessione;
- il **calore** che rappresenta la pienezza dei suoni di bassa frequenza (< 250 Hz);
- la **brillanza** che rappresenta la vivezza di un suono per la presenza di un grande numero di armoniche e si manifesta in un ambiente vivace alle alte frequenze;
- la **diffusione** che rappresenta la spazialità del suono riverberato;
- il **bilanciamento** che rappresenta il giusto peso fra le varie sezioni di un'orchestra;
- la **fusione** che rappresenta la mescolanza dei vari strumenti dell'orchestra;
- l'**accordo** (o ensemble) che rappresenta la capacità dei musicisti di suonare all'unisono e quindi dipende fortemente dalla capacità di sentirsi l'un l'altro;
- l'**attacco** o immediatezza di risposta che indica la prontezza di una sala alla risposta di una nota;
- la **tessitura** che fornisce una sensazione all'ascoltatore del percorso fatto da un'onda sonora e che è legato alle varie riflessioni dell'onda;
- l'**ampiezza** dinamica che rappresenta la differenza di livello acustico fra i suoni più intensi e più flebili percepiti in una sala;
- la **qualità totale** che rappresenta la bellezza del tono;
- l'**uniformità** che fornisce un indice di eguale comportamento della sala e quindi di assenza di zone morte nelle quali il suono non è percepito con sufficiente chiarezza.

Il criterio progettuale pensato da Beranek classificava le sale in base ad un punteggio ottenuto come somma dei singoli punteggi riferiti alle qualità sopra descritte. In

questo modo un punteggio basso in una qualità poteva essere compensato da un punteggio alto in un'altra qualità.

Tuttavia, queste qualità nella realtà non sono additive e non possono compensarsi a vicenda, come Beranek aveva ipotizzato. Inoltre, le qualità proposte da Beranek sono difficilmente correlabili alle proprietà geometriche e progettuali di una sala.

L'insuccesso della teoria di Beranek ha portato alla fine del Novecento altri ricercatori a sviluppare quella che sarebbe diventata la nuova acustica architettonica, che oggi è alla base dei software CAD di progettazione acustica.

### 2.3 Le problematiche di una sala musicale

Una sala destinata all'ascolto di una performance musicale è un sistema molto complesso e deve soddisfare requisiti di diversa natura, tra cui:

- **requisiti architettonici:** l'ambiente deve rispettare precisi canoni estetici;
- **requisiti acustici:** l'ambiente deve garantire un ascolto ottimale dell'offerta musicale;
- **requisiti funzionali:** l'ambiente deve garantire una serie di servizi accessori rivolti sia al pubblico (servizi igienici, zone ristoro, uscite di emergenza) sia a chi performa (backstage, camerini, strumenti di supporto).

In aggiunta ai requisiti sopra elencati è da considerare in fase di progettazione anche la dimensione soggettiva, legata ai giudizi e al gradimento dell'uomo fruitore della sala. Il considerare l'interazione tra l'ambiente costruito e l'uomo (tra lo "spazio oggettivo" e lo "spazio soggettivo") rappresenta il cambiamento concettuale più importante degli ultimi decenni nella progettazione acustica.

## 2.4 Il comportamento ideale di una sala: isotropia, omogeneità e il fenomeno dell'interferenza

Per poter definire in modo analitico lo "spazio oggettivo" Sabine propose l'utilizzo di un unico indicatore: il tempo di riverberazione. Poiché tutte le qualità acustiche proposte da Beranek sono in qualche modo legate alla riverberazione, appare evidente come il tempo di riverberazione sia efficace per descrivere complessivamente il comportamento acustico di una sala.

La formula per il calcolo del tempo di riverberazione proposta da Sabine è valida solo nel caso di campo sonoro diffuso, vale a dire quando sono rispettate le seguenti condizioni:

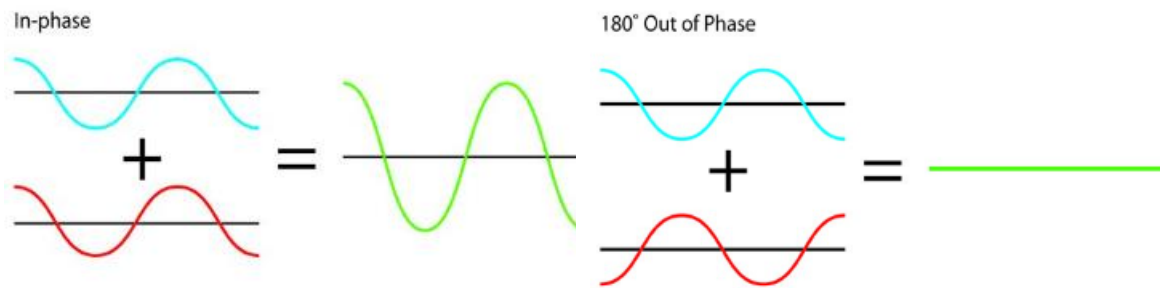
- Omogeneità: la media temporale della densità di energia in tutti i punti della sala è costante;
- Isotropia:
  - la direzione di arrivo dei raggi sonori in ciascun punto deve essere ugualmente probabile;
  - la media temporale del flusso di energia sonora in ciascun punto deve essere costante.

La condizione di omogeneità richiede che la densità acustica sia uniforme in tutta la sala e non devono esserci zone di addensamento dei raggi acustici o di forte assorbimento.

La condizione di isotropia dipende sia dalla geometria dell'ambiente che dall'assorbimento dei materiali che costituiscono le pareti; una parete fortemente assorbente, per esempio, condiziona fortemente il campo acustico nelle zone adiacenti e rende l'ambiente anisotropo.

Una buona progettazione deve tendere al raggiungimento delle due ipotesi di omogeneità e isotropia, agendo sulla geometria dell'ambiente e sugli assorbimenti dei materiali.

Nelle situazioni reali ottenere ambienti perfettamente isotropi e omogenei è impossibile a causa dei fenomeni di interferenza che si creano; la sovrapposizione di onde sonore dirette e riflesse, infatti, genera in alcuni punti un rafforzamento del suono e in altri punti un indebolimento. Il principio che sta alla base di questo fenomeno è rappresentato in Figura 6.



*Figura 6 Cancellazione di fase*

Un ambiente con pareti molto direttive e speculari può dar luogo a fenomeni di interferenza e creare un campo sonoro fortemente anisotropo. Per contenere il problema è buona norma avere pareti convesse (disperdenti) e non concave.

## 2.5 Nuovo approccio all'acustica delle sale

Una sala può essere pensata come un sistema fisico che, una volta sollecitato (da segnali acustici), restituisce una determinata risposta, che è funzione del proprio comportamento fisico-acustico. In questo modello a "black box", la conoscenza del legame tra ingresso e uscita consente di prevedere il comportamento della sala.



## Sistema acustico equivalente alla sala



Figura 7 Studio delle sale con modello "black-box" (1)

Si dimostra che, se di un ambiente fisico si conosce la risposta ad un segnale impulsivo, allora si può ottenere la risposta a qualunque segnale mediante un integrale di convoluzione del segnale dato con la risposta all'impulso. L'approccio moderno dell'acustica si basa proprio sull'idea di comprendere il campo acustico di un ambiente partendo dall'analisi della sua risposta all'impulso.

La risposta all'impulso di un sistema può essere calcolata in diversi modi. Qui di seguito si riportano i principali:

- **Metodo impulsivo**

È un metodo accurato e comunemente usato; richiede però che il segnale sia sufficientemente simile ad un impulso ideale (Delta di Dirac) per poter ottenere buoni risultati. Tuttavia, un impulso del genere è di durata così corta che, per qualsiasi ampiezza che non sovraccarica l'apparecchio di riproduzione, contiene troppa poca energia. Questo metodo, quindi, funziona bene solo in ambienti estremamente silenziosi, mentre in presenza di rumore di fondo risulta inadeguato (2).

- **Metodo MLS**

Questo metodo sfrutta una sequenza di massima lunghezza (MLS), vale a dire una ripetizione di una stessa sequenza di impulsi positivi e negativi, di uguale ampiezza, distribuiti in modo casuale. Una sequenza di massima lunghezza

assomiglia ad un rumore bianco e contiene migliaia di impulsi nell'intervallo di misura, a differenza del classico impulso di prova, che contiene un solo impulso per ogni intervallo di misura. Nel metodo MLS la risposta all'impulso del sistema viene calcolata applicando una correlazione al segnale MLS. La correlazione in questione consiste nell'introdurre un ritardo temporale al segnale MLS e confrontarlo con sé stesso; il risultato della correlazione risulta essere un impulso. Per misurare la risposta all'impulso di un sistema, si applica il segnale MLS al suo ingresso. Il segnale di uscita viene correlato con il segnale di ingresso e si ricava così la risposta all'impulso del sistema. Il segnale MLS utilizzato deve essere lungo almeno quanto il tempo di riverberazione dell'ambiente da misurare (2).

- **Metodo TDS**

Il metodo TDS (Time Delay Spectrometry) si basa su un segnale di eccitazione con sweep di frequenza e un ricevitore sintonizzato in modo sincrono con lo sweep. È poi presente un ulteriore elemento, l'offset, che può introdurre un ritardo temporale tra il segnale di eccitazione sweepato e il ricevitore. Agendo sull'offset si possono isolare componenti specifiche del suono. Per ottenere la risposta all'impulso dal risultato di una misura fatta con sweep sinusoidale si applica una "deconvoluzione circolare", che consiste nell'effettuare il rapporto, ad ogni frequenza, tra lo spettro del segnale misurato dal microfono e lo spettro del segnale di test (2).

- **Metodo ESS**

Il metodo ESS (Exponential Sine Sweep) ha un funzionamento analogo al metodo TDS ma utilizza un segnale di test sinusoidale con frequenza che cresce esponenzialmente nel tempo. Inoltre, la deconvoluzione in questo caso non è circolare ma avviene rimanendo nel dominio del tempo. Questa soluzione presenta alcuni vantaggi, tra cui il fatto che è possibile separare e analizzare le



distorsioni armoniche, fornendo una misura più pulita e precisa della risposta all'impulso e il fatto che è presente maggiore rapporto segnale-rumore e vi è la possibilità di operare con segnali di test asincroni, rendendo le misure più semplici e accessibili (2).

Molti dei descrittori acustici, inoltre, possono essere derivati dalla risposta impulsiva della sala. Ogni descrittore energetico, infatti, si basa sul calcolo di frazioni di energia e queste si possono calcolare dalla risposta quadratica della pressione mediante semplice integrazione.

## 2.6 I descrittori acustici principali

L'acustica delle sale è valutata mediante parametri acustici che rendono oggettiva la percezione soggettiva del suono in un ambiente confinato.

- **TEMPO DI RIVERBERAZIONE (RT)**

Il tempo di riverberazione è probabilmente il più importante tra i vari descrittori acustici, in quanto ad esso sono legate pressoché tutte le qualità acustiche di un ambiente, tanto che per molto tempo è stato impiegato come unico criterio di progettazione.

L'origine degli studi dell'acustica degli ambienti confinati è dovuta a Sabine, che mise in relazione:

- le caratteristiche geometriche (volume  $V$ , superficie  $S$ );
- le caratteristiche fisiche (coefficienti di assorbimento  $\alpha$  dei materiali che costituiscono l'ambiente). I coefficienti  $\alpha$  possono avere valori compresi tra 0,00 per i materiali riflettenti e 1,00 per i materiali completamente assorbenti;
- il tempo di riverberazione: il tempo che un suono prodotto da una sorgente sonora (rumore, parlato o musica), dal momento in cui essa

viene spenta, impiega per ridursi di 60 dB (ovvero di un milione di volte l'intensità sonora iniziale).

La formula è la seguente:

$$RT60 = 0,161 V / (S \cdot \alpha) \quad [\text{secondi}]$$

Questo parametro definisce la relazione di proporzionalità inversa tra tempo di riverberazione e le unità assorbenti: il valore di RT60 si riduce se vengono aggiunti nell'ambiente materiali che hanno proprietà fonoassorbenti elevate (prossime a  $\alpha=1,00$ ): ne consegue che l'inserimento di particolari materiali può variare significativamente i valori del RT60.

La norma ISO 3382-1 (2009) definisce più specificatamente il tempo di riverberazione T30, che rappresenta la misura dell'intervallo temporale nel quale il livello sonoro si riduce di 30 dB passando dal valore di -5 dB rispetto al livello del suono diretto fino a -35 dB riferito al livello del suono diretto.

- **EARLY DECAY TIME (EDT)**

L'early decay time è la misura della rapidità di decadimento dei primi 10 dB del segnale acustico e viene espresso in secondi come il tempo di riverberazione. Per una sala altamente diffondente dove il decadimento del livello sonoro è lineare, EDT e RT sono solitamente uguali. Nel caso in cui ci siano irregolarità diffusive (volumi accoppiati, accumuli energetici...) allora EDT e RT possono essere molto diversi. L'EDT, rispetto al RT, prende maggiormente in considerazione l'influenza delle prime riflessioni, che sono responsabili dell'intelligibilità e del senso di spazialità. L'EDT, inoltre, varia molto di più nello spazio di quanto non faccia l'RT e per questo motivo viene spesso considerato un valore medio su più punti di misura.

## FRAZIONI ENERGETICHE

Le frazioni energetiche sono degli indicatori della percezione di chiarezza, cioè dell'energia sonora che raggiunge l'ascoltatore entro determinati istanti e che permette di percepire correttamente le sillabe (se ci si riferisce al parlato) o la successione temporale delle note (se ci si riferisce alla musica).

La famiglia di descrittori comprende: la Chiarezza C80, la definizione D50 e l'istante baricentrico  $T_s$ : essi sono concettualmente complementari alla riverberazione che, come detto, è legata alla miscelazione dei suoni in un ambiente confinato.

Si ricorda brevemente che la percezione di chiarezza è legata alla facoltà del cervello umano di combinare il suono diretto con le prime riflessioni in modo tale da permettere una precisa distinzione delle sillabe o delle note: in particolare le riflessioni che arrivano entro 50 ms per il parlato ed entro 80 ms per la musica vengono integrate dal cervello e contribuiscono al miglioramento della percezione (effetto di precedenza o Haas). Le successive riflessioni in genere sono percepite come distinte e contribuiscono alla sensazione di eco.

Si definiscono, quindi, le seguenti grandezze:

$$\text{Chiarezza C80} = 10 \cdot \log_{10} \frac{\int_0^{80\text{ms}} h(t)^2 dt}{\int_{80\text{ms}}^{\infty} h(t)^2 dt} \quad [\text{dB}]$$

$$\text{Definizione D50} = \frac{\int_0^{50\text{ms}} h(t)^2 dt}{\int_0^{\infty} h(t)^2 dt} \quad [-]$$

a cui si aggiunge l'istante baricentrico che rappresenta il tempo medio rispetto all'energia dell'impulso:

$$\text{Istante baricentrico } T_s = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot h(t)^2 dt}{\int_0^{\infty} h(t)^2 dt} \quad [\text{ms}]$$

- **CHIAREZZA (C80)**

Questo indice mette in correlazione la componente iniziale del suono (percepita nei primi 80ms) con la coda sonora. L'energia dei primi 80 ms comprende la componente diretta e le prime riflessioni ed è direttamente correlata con la comprensione del linguaggio e dei passaggi musicali.

I valori ottimali suggeriti dalla letteratura sono:  $-2 < C80 < 2$  dB.

Esiste quindi un campo ottimale di chiarezza: una chiarezza eccessiva o insufficiente sono indesiderate nell'ascolto musicale perché viene meno l'equilibrio tra le note o si perde la definizione e riconoscibilità del suono.

È da notare che il C80 assume valore negativo quando l'energia dopo gli 80 ms supera l'energia compresa nei primi 80 ms, mentre assume valori positivi nel caso opposto.

- **DEFINIZIONE (D)**

Similmente alla chiarezza, l'indice Definizione rappresenta un rapporto tra la coda sonora e l'energia sonora iniziale, in questo caso calcolata nei primi 50 ms. Diversamente dal C80 viene imposto un intervallo di tempo ancora più ristretto per considerare solamente l'effetto delle riflessioni laterali immediate. Questo indice è prevalentemente utilizzato per quantificare la percezione del parlato, mentre il C80 è più indicato per la musica.

- **INTELLIGIBILITÀ DEL PARLATO STI**

La risposta all'impulso permette la determinazione dell'indice di comprensione della parola STI (*Speech Intelligibility Index*). Il concetto alla base della valutazione della comprensione della parola è dato da una prova pratica, che consiste nel

pronunciare un serie di parole o frasi e valutare se un ascoltatore è in grado di riconoscerle correttamente. La percentuale di parole correttamente riconosciute è proporzionale al livello intelligibilità.

Il concetto esposto è formalizzato mediante l'indice STI (definito dalla norma IEC 60268 – 16) che correla la misura del numero delle parole riconosciute in rapporto al numero totale di parole pronunciate: il campo di valori che può assumere è compreso tra zero, per il quale si ha una cattiva comprensione della parola (ambiente che con le riflessioni contribuisce ad un mascheramento continuo dei fonemi pronunciati da un oratore), fino ad un massimo di uno per il quale si ha una perfetta intelligibilità.

L'indice STI fornisce inoltre la base per la valutazione e per la scelta relativa alle caratteristiche dell'impianto di diffusione sonora. Aspetti come la direttività, la potenza e il posizionamento dei diffusori possono risultare estremamente critici in ambiente acusticamente "difficili" ossia carenti per gli aspetti sopra indicati.

Nella seguente tabella si riporta la corrispondenza tra indice STI e la relativa fascia di valutazione della comprensione del parlato secondo quanto indicato nell'Annesso A della norma ISO 9921 "Ergonomia - Valutazione della comunicazione verbale".

*(ISO 9921) Indice STI e fascia di valutazione della comprensione del parlato*

Fascia di valutazione	di STI
Eccellente	> 0,75
Buono	0,60 – 0,75
Accettabile	0,45 – 0,60
Scarso	0,30 – 0,45
Cattivo	< 0,30

- **SOUND PRESUURE LEVEL (SPL)**

L'indice SPL rappresenta il livello di pressione sonora misurato in un punto dello spazio ed è calcolato, per ogni banda d'ottava  $i$ , mediante la formula seguente:

$$SPL_i = 20 \log_{10} \left( \frac{\bar{p}_i}{p_0} \right)$$

Dove  $p_i$  rappresenta la pressione in Pa nel punto dato e  $p_0$  è pari a 20 mPa.

- **STRENGHT (G)**

L'indice G rappresenta il rapporto logaritmico tra l'energia sonora in un punto e l'energia che si misurerebbe in campo libero a 10 m dalla sorgente.

G può essere calcolato secondo la seguente equazione, dove  $t=0$  corrisponde all'inizio del suono diretto, e  $\infty$  ad un tempo maggiore o uguale al punto in cui la curva di decadimento è diminuita di 30 dB.

$$G = 10 \lg \frac{\int_0^{\infty} h^2(t) dt}{\int_{t_e}^{\infty} h_{10}^2(t) dt}$$

dove  $h(t)$  è la risposta all'impulso misurata nel punto di misura.

## 2.7 Spazio oggettivo e soggettivo di una sala

I descrittori acustici sopra citati sono un utile strumento sia di progettazione di ambienti nuovi che di valutazione di spazi esistenti e permettono di caratterizzare lo "spazio oggettivo". Per quanto riguarda le qualità soggettive, nel caso di un suono qualsiasi, è sufficiente che esso sia intellegibile. Per il linguaggio musicale, invece, la definizione dello "spazio soggettivo" di una sala è più complesso e occorre

chiamare in causa un insieme di qualità acustiche. Negli ultimi anni si sono affermate come fondamentali:

- La chiarezza (C80), che dovrebbe essere adeguata a percepire i dettagli dell'esecuzione musicale;
- La riverberazione (TR, EDT), che deve essere sufficiente a dare il senso di spazialità ma non eccessiva da pregiudicare l'intelligibilità;
- L'involuppo, che fornisce all'ascoltatore la sensazione di essere avvolto dalla musica;
- L'intimità, che è responsabile della sensazione acustica globale;
- La Loudness (SPL, G), che è responsabile del giudizio generale di qualità di ascolto e deve essere il più uniforme possibile nell'ambiente.

Queste qualità soggettive sono di solito rivelate mediante giudizi personali con opportuni questionari.

## 2.8 Effetti delle onde dirette e delle riflessioni

In una sala musicale l'ascoltatore riceve circa 8000 riflessioni entro un secondo dal suono diretto di una risposta impulsiva. Ogni riflessione è caratterizzata da:

- un livello sonoro;
- un ritardo rispetto al suono diretto;
- una direzione di provenienza.

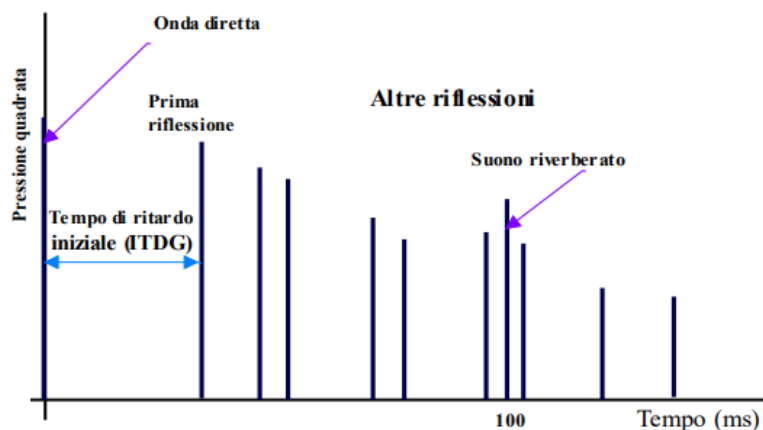


Figura 8 - Rappresentazione dell'ITDG (1)

L'udito umano è altamente selettivo nell'interpretazione di questi dati. Innanzitutto, esso deve stabilire con esattezza la direzione di provenienza del suono. Per fare ciò è in grado di isolare la componente diretta e localizzare il primo fronte d'onda ricevuto giocando sulle differenze di tempo nella ricezione del segnale nell'orecchio destro e sinistro. Poiché le dimensioni della testa interagiscono solo con alcune frequenze, i meccanismi di localizzazione della direzione sono diversi a seconda della lunghezza d'onda del suono emesso.

L'onda diretta diminuisce con il quadrato della distanza, tuttavia l'orecchio, nel valutare la direzione di provenienza, è in grado di combinare assieme l'energia dell'onda diretta e delle prime riflessioni laterali. Esiste un tempo limite entro il quale l'energia sonora che giunge all'orecchio è considerata componente diretta e questo tempo varia a seconda che si tratti di linguaggio parlato o musica. I valori tipici, che peraltro corrispondono con quelli dati in precedenza nella definizione di C80 e D, sono:

- 50 ms per linguaggio parlato;
- 80 ms per linguaggio musicale.

In generale, riflessioni successive ai 50 ms risultano dannose per l'intellegibilità delle parole ma utili a creare nell'ascoltatore un senso di spazialità.

La conoscenza di questi fenomeni è necessaria per ottimizzare la progettazione di ambienti dedicati all'ascolto, comprenderne le problematiche e trovare soluzioni.

Per esempio, spesso vengono utilizzate superfici riflettenti e schermi acustici opportunamente posizionati per indirizzare i raggi acustici verso le zone distanti dalla sorgente o le zone che recepiscono in misura minore la componente diretta del suono. Una gestione sapiente delle riflessioni all'interno di un ambiente chiuso può fare la differenza nell'ottenere un campo acustico uniforme e garantire a tutti gli ascoltatori una percezione acustica ottimale.



## 2.9 Regole di progettazione

La progettazione acustica di una sala è un lavoro complesso e fortemente dipendente dal caso in esame; tuttavia, è possibile individuare una serie di principi di progettazione comuni ad ogni situazione, che fungono da linee guida. La funzione di una sala è di distribuire in modo ottimale l'energia sonora emessa dalla sorgente verso tutti i punti di ascolto. Questo deve essere fatto tenendo a mente che, se si usano superfici assorbenti, l'energia sonora presente in ambiente diminuisce. Ne consegue che, in fase di progettazione, è buona norma:

- limitare al massimo l'assorbimento dei raggi acustici;
- fare in modo che la sala, con la sua geometria e in virtù dei materiali utilizzati, guidi le onde acustiche verso gli ascoltatori;
- non usare tetti completamente assorbenti perché si ridurrebbero molto le prime riflessioni e ne risentirebbe l'ascolto nei posti più lontani dalla sorgente;
- evitare che la parete di fondo, opposta al palco, sia riflettente perché le riflessioni generate possono creare echi e problemi di sovrapposizione tra onde dirette e riflesse. Per non perdere troppa energia è bene che questa parete sia diffondente;
- è bene avere la parete dietro al palco riflettente (o al limite diffondente), per generare riflessioni che rinforzino la componente diretta del suono;
- è bene avere le pareti laterali riflettenti per favorire la sensazione di spazialità.

## 2.10 I CAD acustici

Ad oggi si hanno come supporto alla progettazione acustica i cosiddetti "CAD acustici", strumenti di calcolo sofisticati che supportano il tecnico acustico in tutte le fasi del lavoro. Questi software consentono, partendo da un modello geometrico

CAD della sala, di simularne il comportamento reale e di calcolare i descrittori acustici.

Alcuni software, partendo dalla risposta impulsiva, consentono anche di effettuare l'auralizzazione della sala, cioè, consentono di simulare il comportamento acustico reale della sala in risposta ad una sollecitazione nota. Dando in input al software delle tracce anecoiche, per esempio delle tracce musicali, esso è in grado di riprodurle tenendo conto della risposta acustica reale che si avrebbe nella sala. Questo strumento si rivela molto utile in fase di progetto in quanto consente di avere un'immagine chiara di quale sarà l'acustica della sala prima ancora che questa venga costruita.

Mediante l'analisi dei descrittori acustici e le auralizzazioni, i progettisti valutano l'effetto dei vari interventi acustici (come l'assorbimento di materiale fonoassorbente o schermi riflettenti) fino a giungere alla soluzione ottimale.

### **Utilizzo dell'acustica geometrica: prime riflessioni**

I moderni software di simulazione acustica implementano al loro interno le regole dell'acustica geometrica, in particolar modo per il calcolo delle prime riflessioni. L'acustica geometrica si basa sull'ipotesi che un'onda si comporti come un raggio, il cui angolo di riflessione è pari all'angolo di incidenza. Partendo da questo concetto si possono distinguere due metodi per il tracciamento dei raggi acustici:

- il metodo delle sorgenti immagine (**image source method**)

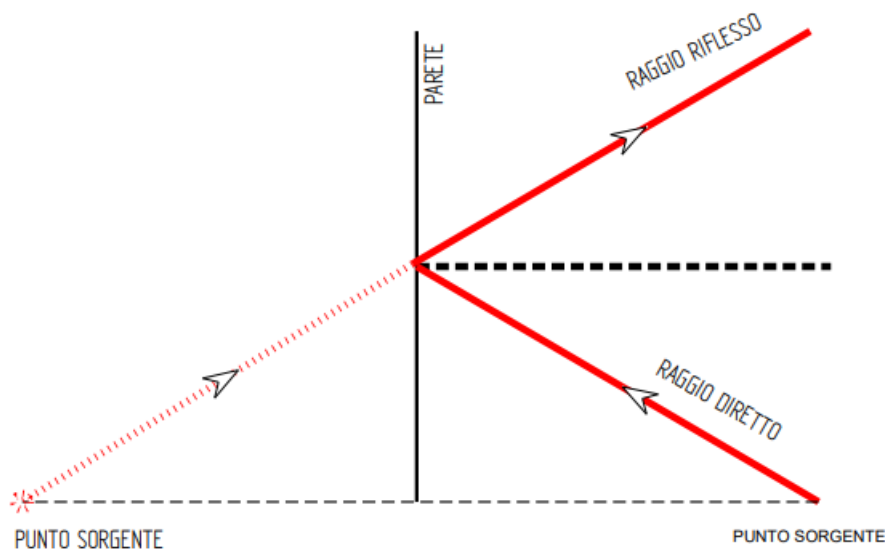


Figura 9 Metodo delle sorgenti immagine (1)

Dato un punto sorgente reale, si crea una sorgente “virtuale” simmetrica rispetto alla parete riflettente; da questa sorgente immagine si origina il raggio riflesso verso il ricettore.

- il metodo del tracciamento inverso dei raggi (**raytracing method**)

Seguendo questo metodo si segue il percorso dei raggi acustici riflessi partendo dal punto di arrivo e risalendo a ritroso verso il punto sorgente.

Come detto in precedenza, questi metodi basati sull’acustica geometrica, sono applicati (separatamente o insieme) dai software di simulazione per caratterizzare il comportamento acustico specialmente nei primi istanti. Il vantaggio di questi metodi è che consentono di caratterizzare le prime riflessioni in tempo, intensità, direzione. Inoltre, questi metodi sono fortemente dipendenti dalla posizione.

### **Utilizzo dell’acustica statistica: coda sonora e riverberazione**

L’acustica geometrica descrive molto bene le prime riflessioni ma non tiene conto degli effetti statistici che si hanno quando i raggi acustici si degradano

energeticamente e si hanno degli effetti diffusivi non trascurabili. La parte di risposta all'impulso interessata da questi fenomeni, detta coda sonora, costituisce la riverberazione.

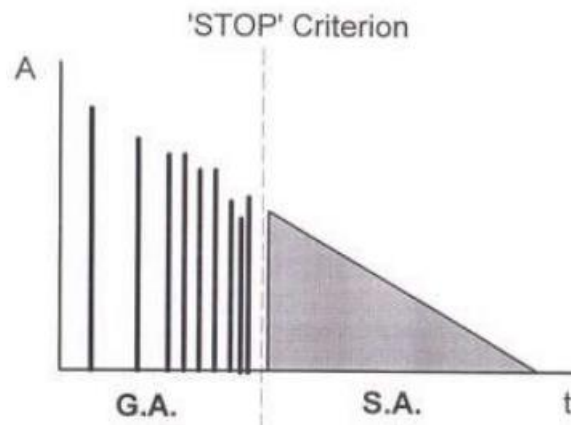


Figura 10 – Legame tra acustica geometrica e statistica (1)

Generalmente l'utilizzo congiunto di acustica geometrica e acustica statistica porta ad una notevole riduzione del tempo di calcolo (1)

### 3. I software utilizzati: Treble e Ramsete

Nello svolgimento del presente lavoro di tesi sono stati impiegati diversi software di simulazione, sia in fase di progetto come strumento utile alla progettazione sia nelle fasi successive come strumento di analisi e confronto.

In fase di progettazione è stato impiegato massivamente il software Treble per simulare la sala, calcolarne i descrittori acustici ed effettuare le auralizzazioni. I risultati ottenuti hanno guidato le scelte progettuali e permesso di individuare le soluzioni migliori. Ad esempio, è stato possibile valutare l'effetto dell'utilizzo di diversi materiali fonoassorbenti, stimare l'utilità o meno di determinati interventi e individuare particolari criticità evidenti solo in alcune zone della sala.

Successivamente, una volta concluso il progetto acustico, sono stati impiegati altri software di simulazione per avere ulteriori risultati e compararli con quelli ottenuti con Treble. L'obiettivo che ci si è posti è stato quello di comparare un software recente come Treble con dei software che invece sono sul mercato da diverso tempo e sono considerati degli standard nel settore. Poiché Treble implementa al suo interno un modello di calcolo ibrido wave-based + raytracing (che verrà approfondito in seguito), questo confronto ha l'ulteriore scopo di comparare questa metodologia, innovativa per il settore, con i metodi di calcolo standard.

#### 3.1 Treble

Il software Treble è un software di simulazione acustica che combina l'accuratezza delle simulazioni wave-based alle basse frequenze con le simulazioni basate sull'acustica geometrica alle alte frequenze. In questo modo è possibile investigare dettagliatamente il comportamento modale alle basse frequenze e allo stesso tempo sfruttare la rapidità di calcolo dei metodi basati sull'acustica geometrica per l'analisi delle alte frequenze (3).

Quando almeno due onde si sovrappongono, cosa che è molto probabile che accada in una stanza a causa delle numerose riflessioni sui confini, pressioni positive e negative si sommano in ogni punto dello spazio e nel tempo. Ciò si traduce in una

cosiddetta onda stazionaria o pattern di interferenza, che si verifica alle frequenze naturali (o frequenze proprie) di una stanza, risultando in un livello di pressione sonora più elevato a quelle frequenze. Queste sono chiamate anche “modi della stanza” e sono determinate principalmente dalle dimensioni della stanza. I modi della stanza giocano un ruolo fondamentale alle basse frequenze, ma iniziano a sovrapporsi molto rapidamente quando la frequenza aumenta (il numero dei modi obliqui è una funzione cubica della frequenza). Quindi le informazioni esatte provenienti dai singoli modi diventano meno cruciali nell'analisi del campo sonoro. La frequenza di Schroeder è un metro di paragone consolidato che rappresenta la frequenza alla quale la sovrapposizione modale è tripla, ovvero almeno tre modi rientrano nella larghezza di banda a metà potenza di un modo. Essa è definita come:

$$f_{Schroeder} = 2000 \cdot \sqrt{\frac{T}{V}},$$

Dove T è il tempo di riverberazione e V è il volume dell'ambiente.

Una pratica comune a tutta la comunità scientifica nell'acustica ambientale consiste nell'impostare la frequenza di transizione nelle simulazioni su un valore da uno a quattro volte la frequenza di Schroeder.

Nel simulare il comportamento alle basse frequenze, Treble non aggiunge alcuna approssimazione alla fisica del problema e risolve numericamente l'equazione d'onda nel dominio del tempo. La propagazione acustica in uno spazio tridimensionale può essere descritta dal seguente sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \rho_0 c^2 \nabla \cdot \mathbf{v} &= 0, \\ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0} \nabla p &= \mathbf{0}, \end{aligned}$$

Dove  $p$  è la pressione [Pa] in un particolare punto dello spazio in un tempo  $t$ ,  $v$  è la velocità [m/s],  $\rho_0$  è la densità dell'aria e  $c$  è la velocità del suono nell'aria.

Questo insieme di equazioni è esattamente equivalente all'equazione d'onda del secondo ordine più comunemente usata.

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial \tau}$$

Treble risolve, quindi, in modo esatto il problema fisico e descrive in modo ottimale il comportamento modale della sala alle basse frequenze.

Il costo computazionale  $t_c$  legato all'utilizzo dell'analisi modale per le basse frequenze è determinato soprattutto dalla più alta frequenza simulata (detta "frequenza di transizione") e poi dal volume dell'ambiente e dalla lunghezza della risposta all'impulso.

Effettuare una simulazione con il metodo wave-based in tutto lo spettro avrebbe un costo computazione enorme, pertanto, al di sopra di una certa frequenza (la frequenza di transizione) Treble passa a simulare l'ambiente con i metodi propri dell'acustica geometrica, combinando il metodo delle sorgenti immagine con il metodo raytracing.

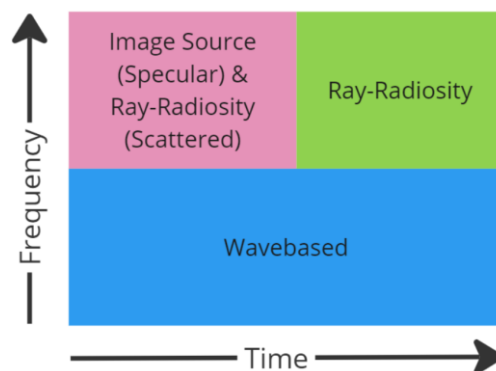


Figura 11 Metodo di calcolo delle simulazioni acustiche di Treble

La comunità scientifica è d'accordo sull'impostare la frequenza di transizione nelle simulazioni su un valore da uno a quattro volte la frequenza di Schroeder. Treble suggerisce per impostazione predefinita una frequenza di transizione pari a quattro

volte la frequenza di Schroeder per il volume della stanza considerata, utilizzando un'ipotesi iniziale per il tempo di riverberazione di un secondo. Si noti che la frequenza di Schroeder richiede la conoscenza preliminare di  $T$  (che è sconosciuto ed è uno degli scopi principali della simulazione), quindi questo suggerimento è un'approssimazione.

Per quanto riguarda l'ibridazione tra la soluzione wave-based e la soluzione con acustica geometrica, Treble unisce i risultati di entrambi i solutori in una risposta all'impulso su tutto lo spettro. La soluzione wave-based viene filtrata con un filtro passa-basso per rimuovere il contenuto di frequenza al di sopra della frequenza di transizione e, analogamente, la soluzione con acustica geometrica viene filtrata con un filtro passa-alto al di sotto della frequenza di transizione. Le due risposte all'impulso vengono quindi sommate per generare la risposta ibrida.

Nel presente lavoro di tesi sono emerse le grandi potenzialità del software Treble. L'interfaccia utente intuitiva e il fatto di funzionare su browser web garantiscono una ottima esperienza utente, oltre che una grande versatilità. Non essendo vincolati alla potenza di calcolo della macchina locale, è possibile svolgere più simulazioni in contemporanea e si accorciano di molto i tempi di lavoro. Inoltre, la possibilità di ottenere rapidamente delle auralizzazioni di alta qualità e molto immersive, garantisce all'utente un utile strumento in più per valutare l'acustica dell'ambiente che si sta studiando. Non per ultima, la possibilità di studiare in modo dettagliato la risposta alle basse frequenze con il calcolo wave-based, pur non rinunciando alla velocità di calcolo, rende Treble un software estremamente interessante rispetto agli altri software di simulazione.

Esistono tuttavia alcuni limiti del software che, sebbene per la grande maggioranza dei casi studio non rappresentano un problema, possono risultare evidenti in alcune particolari situazioni. Treble, ad esempio, non consente di attribuire più di un materiale per ogni superficie e quindi non è possibile assegnare coefficienti di assorbimento diversi per le due diverse facce di una superficie. Questo problema risulta evidente, ad esempio, qualora una superficie rappresenti il soffitto di un

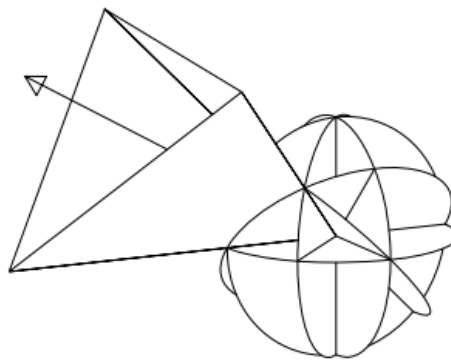


piano e il pavimento del piano successivo; per ovviare al problema occorre creare due superfici identiche con un leggero offset e attribuire i due materiali diversi alle due superfici, anche se questo rischia di incrementare il peso computazionale soprattutto per il calcolo wave-based.

Ulteriori limiti che ad oggi caratterizzano Treble sono ad esempio l'impossibilità per l'utente di visualizzare i raggi acustici delle prime riflessioni e le aree maggiormente riflettenti (cosa che altri software consentono di fare) e la scarsa compatibilità con software di modellazione CAD per l'importazione della geometria.

### 3.2 Ramsete

Il software di simulazione acustica Ramsete utilizza il metodo di calcolo pyramid-tracing, nel quale vengono tracciati fasci divergenti di forma piramidale per simulare il comportamento delle onde sonore.



*Figura 12 Tracciamento piramidi in Ramsete*

La suddivisione della superficie in triangoli è eseguita mediante una versione adattata dell'algoritmo di Tenenbaum che prevede la suddivisione di una sfera in otto ottanti. Tale approccio consente di generare un numero di piramidi pari a una potenza di 2 ( $8 \cdot 2^N$ ), garantendo inoltre che tutte abbiano la stessa area di base e creando così una sorgente sonora isotropica.

I benefici di questa metodologia includono la possibilità di poter utilizzare un ricevitore puntiforme e il numero limitato di fasci da emettere (si ottengono

simulazioni discrete già con 2048 piramidi), contribuendo alla velocità di elaborazione dei dati da parte di un calcolatore.

Il tracciamento del raggio centrale di ogni piramide segue le ipotesi dell'acustica geometrica, con riflessione speculare in caso di impatto con una superficie, conforme alla legge di Snell. Dopo ogni riflessione, si determina la posizione della sorgente immagine rispetto alla superficie impattata, proseguendo il tracciamento del raggio dalla nuova sorgente virtuale.

La verifica dell'impatto sui ricevitori si effettua quando uno di essi si trova all'interno di una piramide in fase di tracciamento. In caso di ricezione di energia da parte del ricevitore, il contributo ricevuto viene registrato in una matrice apposita, composta da 10 colonne (rappresentanti le 10 bande di frequenza) e da diverse centinaia o migliaia di righe, ognuna corrispondente a un intervallo temporale specifico rispetto all'istante di emissione. È da notare che la lunghezza della matrice dei risultati è direttamente proporzionale alla durata della risposta impulsiva da calcolare e alla risoluzione temporale desiderata.

Il tracciamento delle piramidi è esteso fino ad ordini elevati, anche se è possibile limitarlo a un ordine predefinito, al fine di ricostruire integralmente l'intera coda sonora in ogni punto di ricezione. In contrasto con gli altri tracciatori di fasci divergenti implementati finora, questo modello non fa affidamento su alcuna relazione dell'acustica statistica per la ricostruzione della parte finale della coda riverberante, mantenendo un approccio completamente deterministico. Con l'avanzare del percorso, la "base" della piramide si espande gradualmente, raggiungendo dimensioni superiori all'intero ambiente. In tali circostanze, tutti i ricevitori rimangono costantemente all'interno della piramide e, pertanto, sono costantemente colpiti dai raggi. Questo aspetto è cruciale poiché assicura che la coda riverberante conservi un dettaglio sufficiente, evitando gli artefatti tipici di altri modelli di calcolo, i quali possono generare una probabilità decrescente di impatto su un ricevitore in relazione al percorso da esso percorso.

In Ramsete, utilizzando il metodo pyramid-tracing, la precisione del risultato non dipende così tanto dal numero di raggi lanciati. Il numero di piramidi dipende solamente dalla risoluzione temporale della risposta all'impulso e dalla sua lunghezza.

Analogamente agli altri tracciatori di fasci divergenti, come il Beam Tracing e il Cone Tracing, nel pyramid-tracing di Ramsete la coda sonora tende ad essere sottostimata nel campo riverberante. Ciò è dovuto all'aumentare delle dimensioni della base di ogni fascio, che comporta un accrescimento della probabilità di "perdere" una sorgente immagine. Di conseguenza, diventa imperativo apportare una correzione alla coda sonora, correzione che non risultava necessaria con gli algoritmi basati su Ray Tracing, a condizione, tuttavia, di tracciare effettivamente il numero di raggi richiesto dalla relazione specifica.

## 4. Descrizione del caso studio

Il presente lavoro di tesi ha come fulcro la progettazione acustica di un teatro, ad oggi in fase di progettazione, che verrà edificato nella città di Mantova. Si tratta di un edificio di circa 1100 m<sup>2</sup> su due piani, che verrà destinato alla riproduzione di spettacoli teatrali e musicali, in prevalenza musica jazz.

In questo documento viene descritto il lavoro svolto per la progettazione acustica del teatro, gli strumenti utilizzati, le metodologie, le criticità riscontrate e i risultati a cui si è giunti, fino alla definizione del progetto esecutivo che verrà presentato alla committenza.

Il lavoro è stato svolto in collaborazione con lo studio di consulenza acustica ACU.TO di Torino, nelle figure dell'Arch. Chiara Devecchi e dell'Ing. Paolo Onali.

Il presente lavoro funge anche da caso studio su cui valutare l'utilizzo dei diversi software di simulazione in una situazione complessa. Il teatro in questione rappresenta infatti un ottimo banco di prova per effettuare un confronto tra software, in quanto si tratta di un ambiente medio-grande con una geometria piuttosto complessa, mentre in letteratura questo tipo di confronto viene spesso eseguito su scenari più semplici, come stanze piccole, di pianta rettangolare e non arredate. La presenza di superfici sia assorbenti che riflettenti, di arredamento e di un grande volume aumentano il grado di difficoltà di calcolo e risulta interessante comparare come i diversi software di simulazione giungano alla risoluzione del problema e quanto divergano i risultati ottenuti.

Come già accennato in precedenza, il teatro sarà utilizzato per la riproduzione di musica live, in particolar modo di musica jazz. Mentre sulla progettazione di sale concerto per musica pop e rock si ha una discreta letteratura alle spalle, per la progettazione di sale dedicate alla musica jazz sono pochi i riscontri che si hanno consultando la letteratura scientifica. Risulta quindi interessante valutare come il know-how di progettazione acustica riguardante altre tipologie di sale si possa traslare al caso in esame.

Un ulteriore grado di complessità è rappresentato dalle dimensioni del teatro. Quasi sempre le sale dedicate alla riproduzione di musica jazz sono di piccole dimensioni, con una zona palco e un numero di occupanti ridotti. Il teatro in esame, invece, con un volume di 6.306 m<sup>3</sup> e 1010 occupanti previsti a progetto, rappresenta un caso più unico che raro.

Gli elementi di maggior criticità del teatro dal punto di vista della progettazione acustica sono:

- l'uniformità di ascolto in platea:  
con una vasta platea di 500 m<sup>2</sup> si dovrà ottimizzare l'ascolto in modo da renderlo il più uniforme possibile e si dovrà garantire una percezione ottimale anche nei posti più distanti dal palco;
- la presenza di una zona ristorante al primo piano:  
da un lato si dovrà garantire un ascolto attenuato e una buona intellegibilità del parlato nella zona dedicata al consumo di cibo, dall'altro quest'area sarà fonte di disturbo per l'ascolto in platea e andrà minimizzato il disturbo reciproco.

## 5. La forma della sala: analisi della pianta e sezione

La sala del teatro, comprensiva di palco, platea e primo piano, presenta un volume di 6.306 m<sup>3</sup> e ha dimensioni approssimative di 25m x 34m. Trattandosi di un ambiente medio-grande destinato all'ascolto della musica è necessario garantire un ascolto il più uniforme possibile in tutta la sala, per far sì che in tutti i posti a sedere sia garantita una fruizione ottimale della musica che viene riprodotta. Oltre a ciò, dovranno essere garantiti i requisiti minimi in termini di tempo di riverberazione, chiarezza e forza per questa tipologia di ambiente.

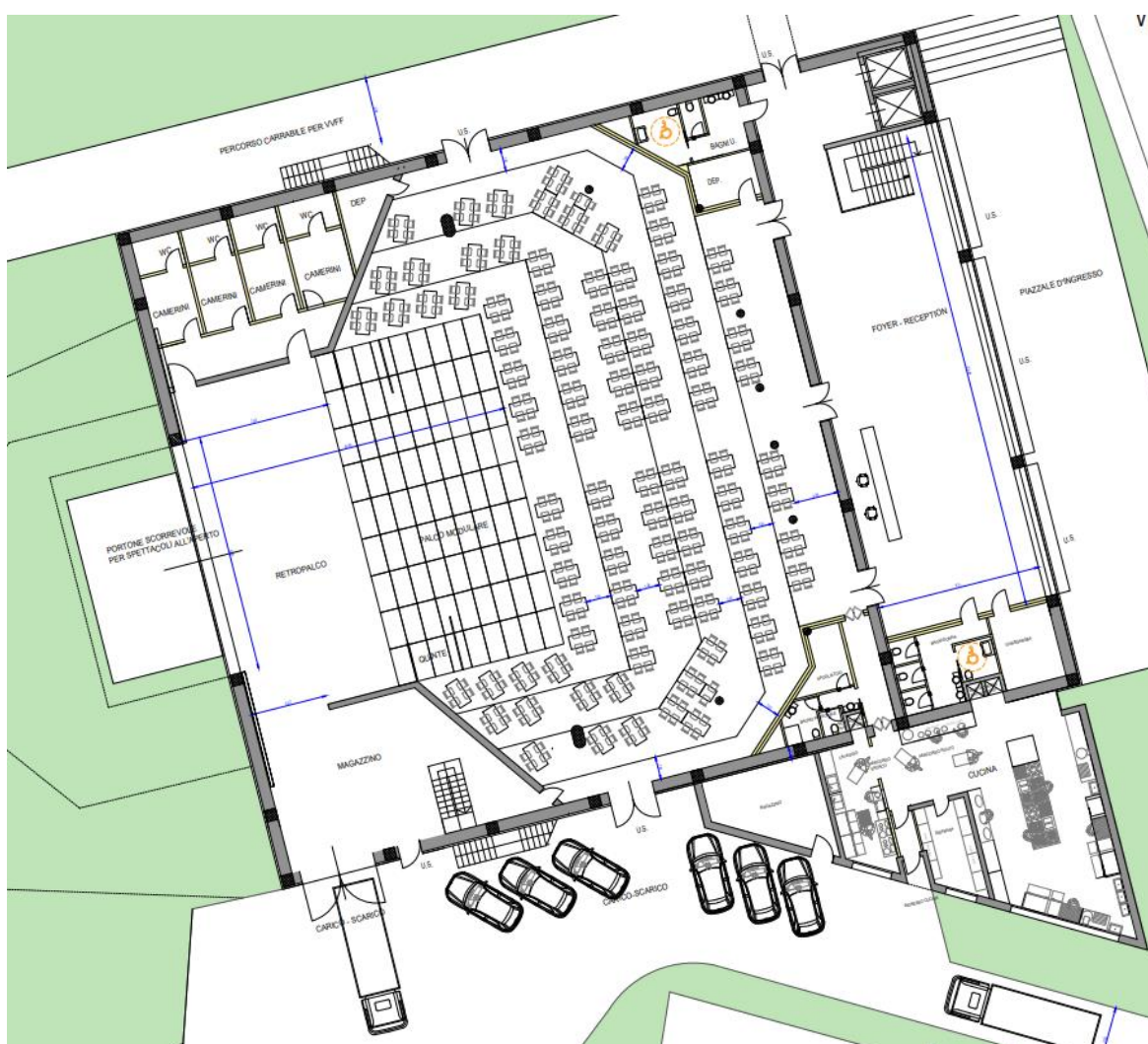
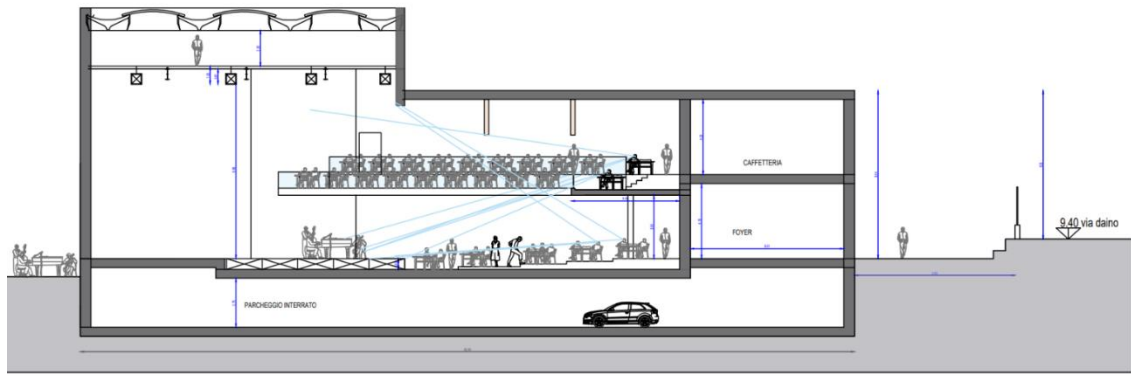


Figura 13 Pianta piano terra teatro



*Figura 14 Sezione longitudinale teatro*

## 6. Costruzione modello CAD rappresentativo dell'ambiente

Il progetto architettonico del teatro prevede oltre alla sala destinata alla riproduzione della musica anche una serie di locali ausiliari come il backstage, il magazzino, il foyer, la cucina, i servizi e la graticcia. Tutti questi ambienti, pur comunicando con la sala centrale, non sono direttamente coinvolti nei fenomeni di propagazione acustica che avvengono in essa e non contribuiscono, almeno in una prima analisi, all'acustica della sala.

Perciò, prima di procedere con l'analisi dell'acustica del teatro occorre innanzitutto individuare l'ambiente da verificare, vale a dire la geometria chiusa nella quale sono inseriti solamente le sorgenti, i ricevitori e tutte le superfici che contribuiscono ai fenomeni acustici. Il modello acustico sarà quindi costituito da una semplificazione del modello architettonico.

Nel caso in esame, l'ambiente oggetto di verifica è costituito dal guscio contenente la zona palco, la platea e la zona al piano primo. Per rendere possibile le successive analisi e per sfruttare i software di simulazione acustica, viene quindi creato un modello CAD dell'ambiente, sfruttando il software Sketchup.

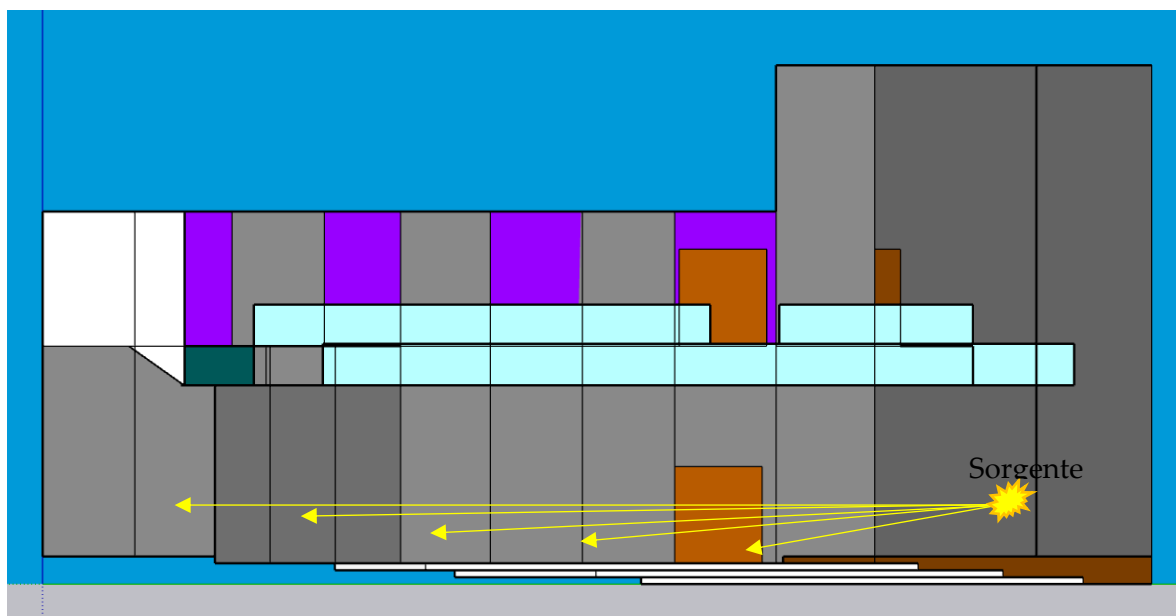


## 7. Prime stime mediante acustica geometrica

### 7.1 Visibilità

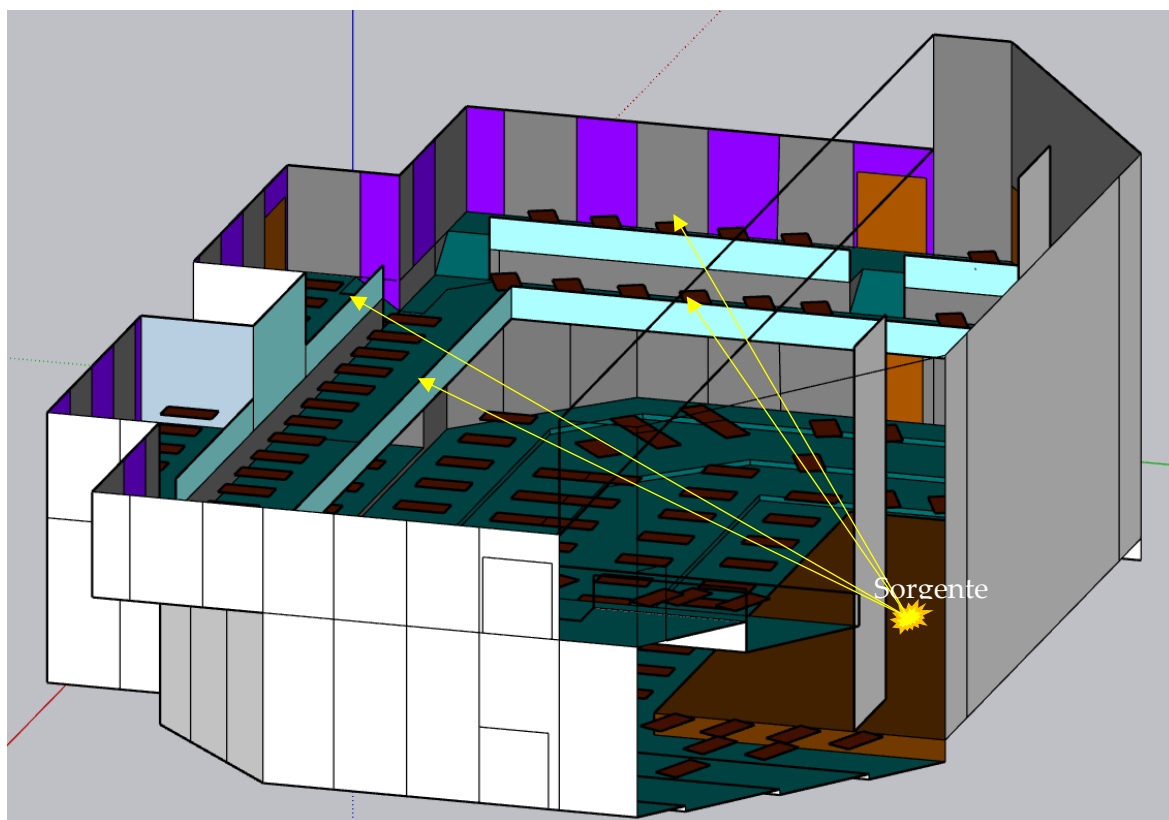
Il primo passo da svolgere consiste nel valutare la “visibilità” di tutti i punti del teatro rispetto ad una sorgente posta sul palco in posizione centrale. In questo modo si possono individuare eventuali zone che non recepiscono la componente diretta del suono. Questa condizione, se possibile, è da evitare fin da subito in fase di progetto, in quanto può generare una condizione acustica sfavorevole, difficile da compensare in seguito con interventi acustici.

La scelta progettuale di collocare la platea su dei gradoni garantisce un’ottima visibilità in tutti i posti a sedere. Pertanto, non si rende necessario l’utilizzo di schermi riflettenti di rinforzo al piano terra.



*Figura 15 Visibilità posti in platea*

La zona che più risente di una scarsa visibilità è il piano primo; qui, infatti, prevedendo che gli occupanti siano seduti, la componente diretta del suono difficilmente raggiunge gli ascoltatori.



*Figura 16 Visibilità posti nel primo piano*

In questo caso, il fatto che la superficie del primo piano si sviluppi su due gradoni è favorevole perché impedisce che gli occupanti posti più esternamente verso il palco mettano “in ombra” quelli alle loro spalle dalla componente diretta del suono. Data la posizione reciproca tra la sorgente posta sul palco e gli ascoltatori al piano primo, le balaustre in vetro previste da progetto sono l’elemento architettonico che pregiudica maggiormente la visibilità. Questa condizione rappresenta sicuramente un elemento problematico per quanto riguarda l’ottimizzazione acustica del teatro e deve essere ulteriormente approfondita, per comprendere se la scarsa visibilità può essere compensata con degli interventi o se è necessario rivedere il progetto architettonico, eliminando l’elemento problematico.

## 7.2 Riflettori acustici

Per compensare il fatto che la componente diretta del suono difficilmente raggiunge gli occupanti al primo piano, si è valutato di posizionare degli schermi riflettenti sul soffitto. Questa soluzione è spesso impiegata nei progetti acustici di grandi ambienti

in tutte quelle situazioni in cui è necessario rafforzare l'ascolto in alcune zone critiche o eliminare riflessioni indesiderate, direzionandole altrove. Il grande volume della sala e la geometria "a sbalzo" della zona ristorante al primo piano, tuttavia, rendono difficile la progettazione di riflettori acustici e l'effetto benefico che questi apporterebbero all'acustica dell'ambiente è comunque limitato. In fase progettuale si è quindi scelto di prediligere il fonoassorbimento e quindi l'eliminazione delle riflessioni, piuttosto che il loro direzionamento. Questa scelta è dovuta soprattutto alle grandi dimensioni dell'ambiente e alle diverse criticità che presenta (come verrà mostrato nel capitolo successivo), che dovranno essere risolte per raggiungere i requisiti acustici richiesti.

## 8. Simulazione ambiente non trattato e individuazione delle criticità

Per poter ottimizzare l'acustica del teatro occorre innanzitutto individuarne le criticità; le prime stime ottenute con l'acustica geometrica stabiliscono un buon punto di partenza, ma per ottenere un'analisi più accurata e quantitativa è necessario utilizzare un software di simulazione acustica.

Partendo dal modello CAD dell'ambiente, mediante un apposito software, è possibile generare una simulazione acustica del teatro, attribuendo alle varie superfici del modello i differenti coefficienti di assorbimento dei materiali impiegati. Essendo noti dal progetto architettonico i materiali che saranno impiegati nella costruzione, è possibile ricreare virtualmente un *digital twin* fedele dello stato *ante-operam* del teatro, vale a dire prima di qualsiasi intervento acustico.

Per questa simulazione è stato utilizzato il software Treble; è stata posizionata una sorgente omnidirezionale nel centro del palco a 1.5m dal pavimento, rappresentativa dell'ensemble di musicisti e una serie di ricettori distribuiti in platea e al primo piano. I materiali impiegati in questa simulazione sono:

- Stage floor per il palco
- *Smooth painted concrete* per le pareti e il soffitto
- Wool pile on concrete per i pavimenti
- *Wood* per i tavoli
- *Acoustic door* per le porte di accesso
- Single pane of glass per le balaustre
- Heavy velour draped to half area per il sipario

Il software di simulazione consente di calcolare i valori dei diversi descrittori acustici nei punti in cui sono collocati i ricettori. Inoltre, è possibile inserire nel modello dei ricettori ad area per valutare i valori che i descrittori acustici assumono

nello spazio, ottenendo una mappatura delle varie aree del teatro per valutare l'uniformità di ascolto.

Si riportano di seguito i risultati ottenuti dalla simulazione, sotto forma di grafici contenenti i valori in frequenza dei vari descrittori acustici, mediati tra tutti i ricettori posti nell'ambiente.

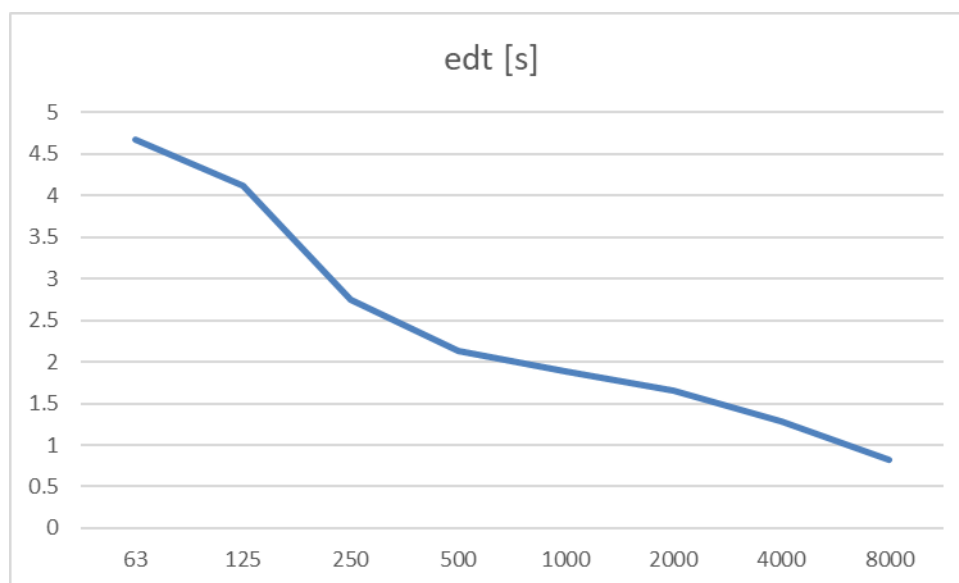


Figura 17 – Andamento in frequenza dell'indice EDT (valore medio tra i ricettori)

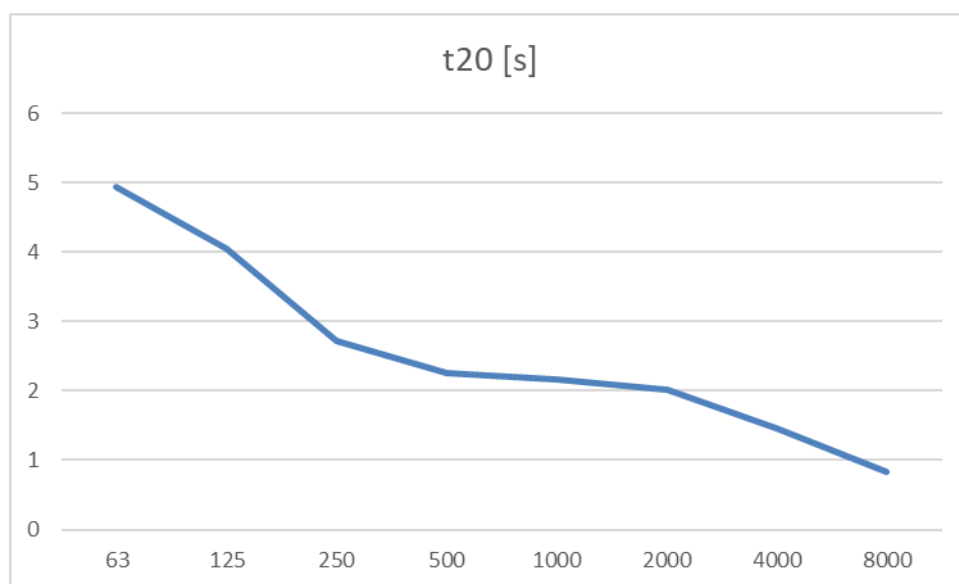


Figura 18 - Andamento in frequenza dell'indice T20 (valore medio tra i ricettori)

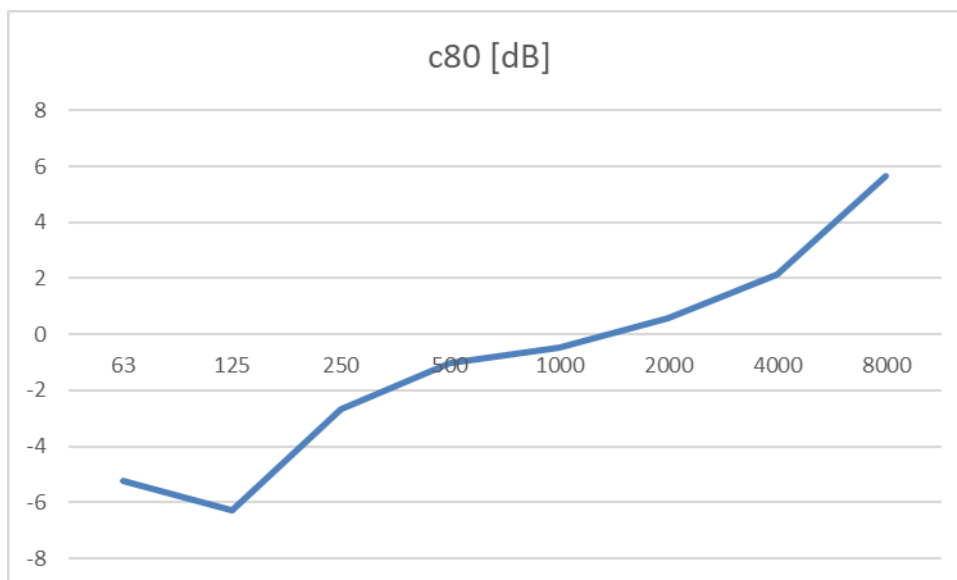


Figura 19 - Andamento in frequenza dell'indice C80 (valore medio tra i ricettori)

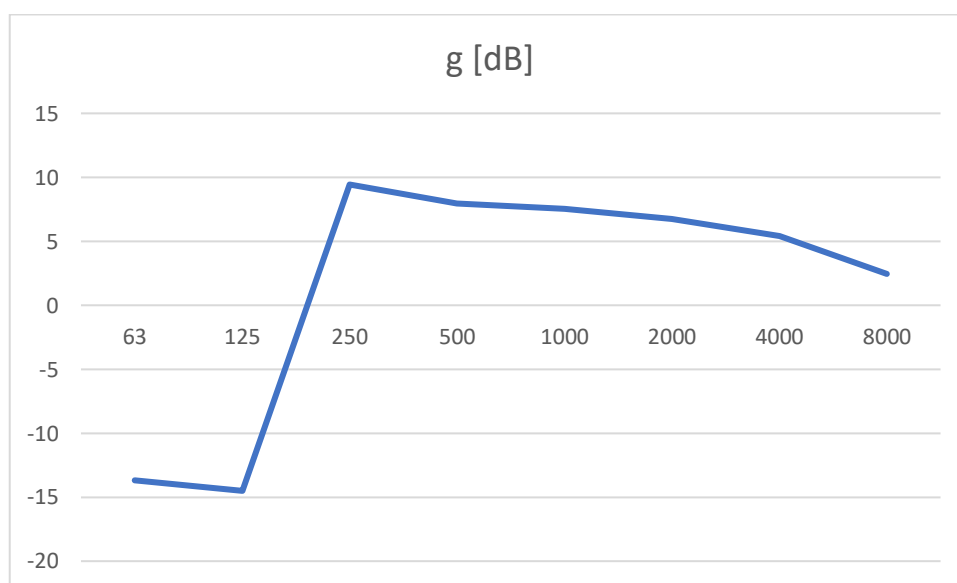


Figura 20 - Andamento in frequenza dell'indice G (valore medio tra i ricettori)

I risultati ottenuti mostrano che il teatro, in assenza di trattamento acustico, presenta un valore di tempo di riverberazione di circa 2 s, eccessivo considerando la destinazione d'uso e comparandolo con locali esistenti con caratteristiche simili. Considerando che l'utilizzo principale del teatro è la riproduzione di musica jazz, il

valore ottimale del tempo di riverberazione si assesta attorno a 1 s; pertanto, uno degli obiettivi del progetto acustico sarà la riduzione della riverberazione mediante l'introduzione di materiale assorbente sulle superfici della sala. Così facendo, una quantità maggiore di energia sonora viene assorbita, invece di essere riflessa e contribuire alla creazione di riverbero.

L'obiettivo dell'ottimizzazione acustica non è solo raggiungere i valori ottimali dei descrittori acustici, previsti per la tipologia di ambiente, ma anche garantire che tutti gli occupanti godano di una percezione acustica ottimale, in qualsiasi zona dell'ambiente si trovino.

L'introduzione di materiale fonoassorbente, necessaria per ridurre il tempo di riverberazione, comporta sicuramente anche un cambiamento nell'andamento spaziale dei parametri acustici e quindi si deve intervenire cercando di garantire comunque un ascolto uniforme in tutto lo spazio.

Mediante il software Treble è possibile anche effettuare un'auralizzazione del modello che è stato creato. In questo modo è possibile valutare anche a livello percettivo le criticità individuate dall'analisi dei descrittori acustici ed eventualmente individuarne altre.

Auralizzando il modello che è stato creato del teatro privo di trattamento acustico, si individua un forte riverbero, che rende difficoltoso distinguere il parlato di un oratore, così come fruire della musica. Inoltre, l'auralizzazione mostra una sensibile differenza di volume tra l'ascolto al primo piano e l'ascolto in platea; questo è dovuto sicuramente alla scarsa visibilità della sorgente che hanno i ricettori al primo piano ma è sintomo anche di una eccessiva componente riflessa di suono in platea, che rafforza eccessivamente l'ascolto. Una possibile soluzione da approfondire consiste nel trattare le pareti al piano terra con materiale fonoassorbente, in modo tale da dissipare energia e limitare le riflessioni. Un'ulteriore problematica che si percepisce ascoltando l'auralizzazione è uno sbilanciamento nella risposta in frequenza dell'ambiente, che risulta eccessivamente risonante sulle basse frequenze.

## 9. Analisi dei materiali e il loro posizionamento

Si riportano nello schema che segue le prescrizioni riguardanti la scelta dei materiali e l'implementazione di componenti fonoassorbenti con il loro relativo posizionamento. Alla luce delle verifiche acustiche svolte, questa soluzione consente di ottenere la condizione acustica ottimale del teatro.

Successivamente si riportano le specifiche dei materiali impiegati (tratti dai certificati forniti dai produttori).

### 9.1 INTONACO FONOASSORBENTE

Nell'immagine seguente (Figura 21) si riportano le superfici che si è ipotizzato di realizzare attraverso l'utilizzo di **INTONACO FONOASSORBENTE**. Nello specifico si sono considerate:

- pareti oblique lato palco;
- pareti piano terra;
- 50% pareti verticali piano 1.

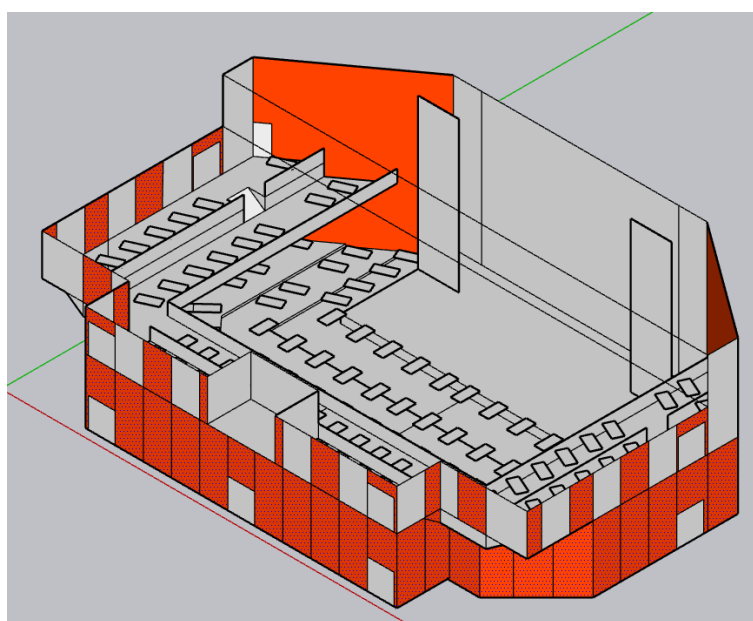


Figura 21 Posizione intonaco fonoassorbente



Al fine di raggiungere un valore ottimale di tempo di riverberazione si è ipotizzato di utilizzare pannelli fonoassorbenti a soffitto tipo **Baswa Phon Base sp. 50mm**:

- granulometria dello strato finale 0,7 mm;
- spessore del sistema 50 mm;
- peso del sistema: 50 mm: ca. 9,06 kg/mq.

Le caratteristiche del materiale (finitura e posa) sono riportate nella figura seguente.

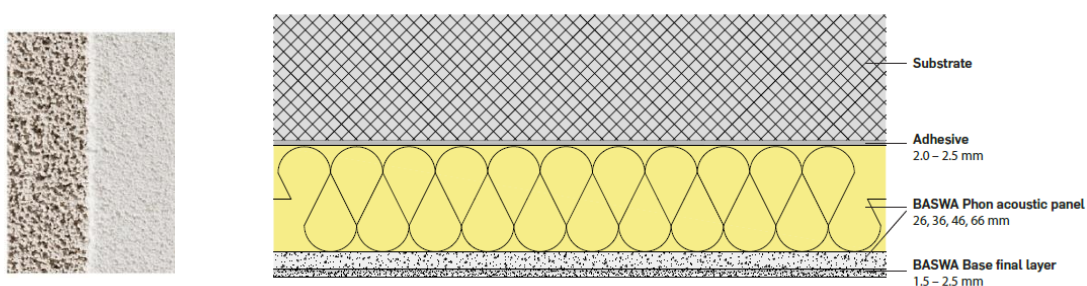


Figura 22 Caratteristiche del materiale (finitura e posa)

Di seguito, a titolo di esempio si riportano l'immagine del pannello fonoassorbente BASWA Phon Base, l'immagine dei pannelli posati in opera e stuccati prima della realizzazione della carteggiatura in opera e l'immagine finale del pannello fonoassorbente posato e carteggiato in opera.



Figura 23 Pannello BASWA Phon Base



Figura 24 Pannelli posati  
stuccati



Figura 25 Pannelli posati, stuccati e  
carteggiati

Di seguito si riporta il coefficiente di assorbimento del materiale scelto.

Frequenza [Hz]							
63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
0.29	0.35	0.73	0.89	0.84	0.82	0.75	0.7

## 9.2 TRATTAMENTO FONOASSORBENTE SOFFITTO

Nell'immagine seguente (

Figura 26) si riportano le superfici che si è ipotizzato di realizzare attraverso l'utilizzo di **PANNELLI LIGNEI FRESA/FORATI FONOASSORBENTI** con retrostante materassino in fibra minerale. Nello specifico si sono considerati:

- pannelli microforati di legno con intercapedine + poliestere a soffitto;

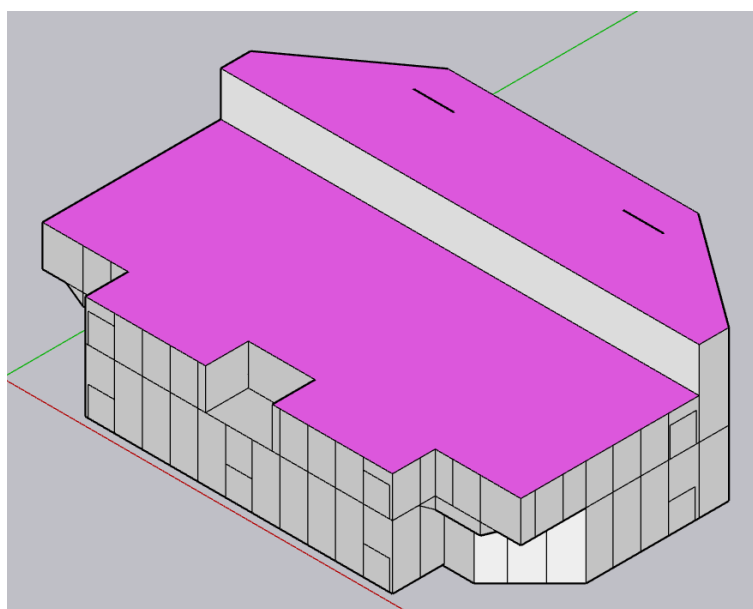


Figura 26 Trattamento fonoassorbente a soffitto

Di seguito si riportano alcune immagini del materiale ipotizzato e successivamente il coefficiente di assorbimento del materiale (pannello ligneo fresato/forato tipo Skema Acustica) in frequenza.

Frequenza [Hz]							
63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
0.17	0.37	0.59	0.67	0.65	0.56	0.47	0.6

Di seguito si riportano alcune immagini del pannello ligneo fonoassorbente ipotizzato a soffitto.

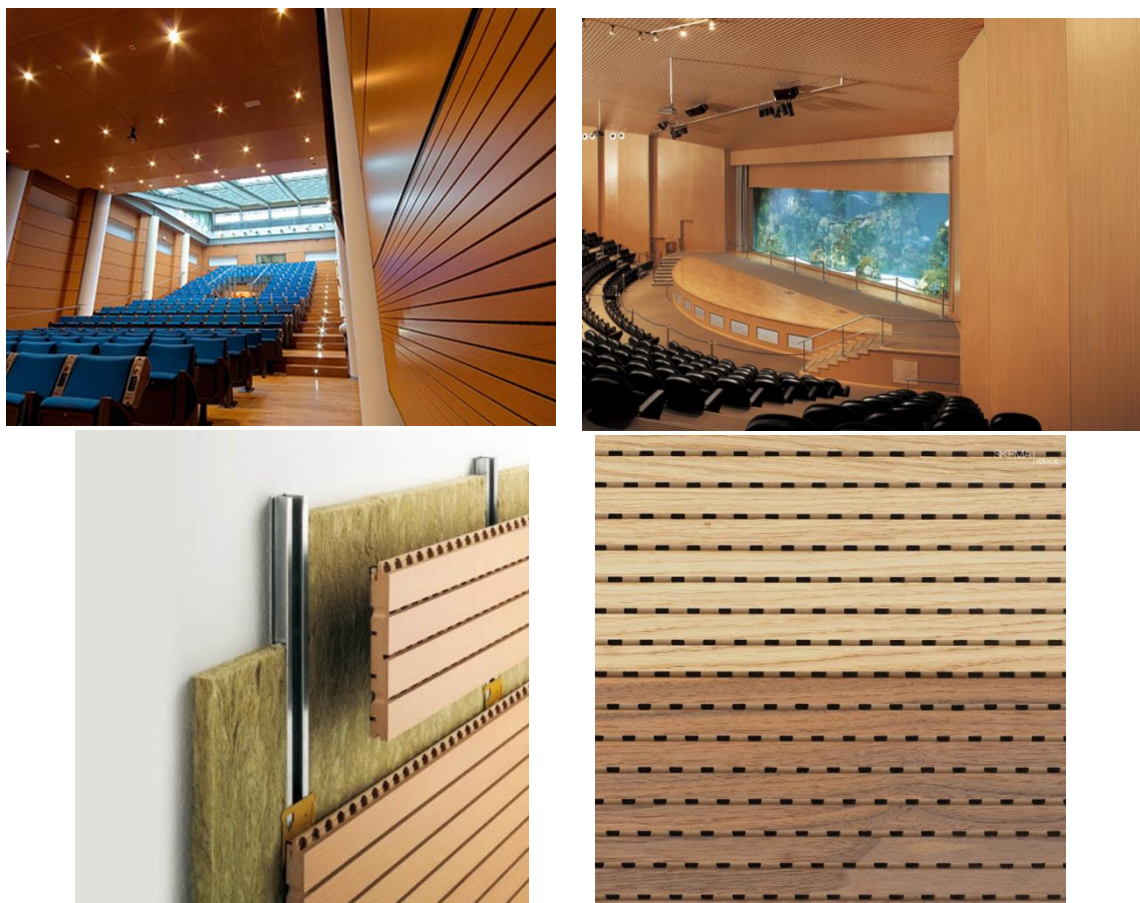


Figura 27 Trattamento fonoassorbente a soffitto tipo SKEMA Acustica

### 9.3 PARETI DIFFONDENTI (INTONACO)

Nell'immagine seguente (Figura 28) si riportano le superfici che si è ipotizzato di realizzare attraverso l'utilizzo di **ELEMENTI DIFFONDENTI (pareti intonacate – non trattate)**. Nello specifico si sono considerati:

- 50% pareti piano 1;
- muri restanti non trattati diversamente.

Di seguito si riporta il coefficiente di assorbimento del materiale diffondente (es. intonaco) in frequenza.

Frequenza [Hz]							
63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

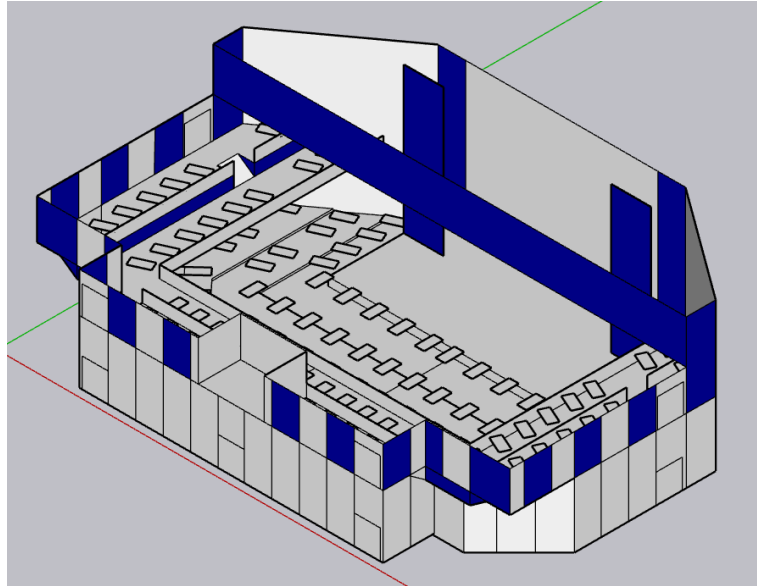


Figura 28 Trattamento diffondente a parete

## 9.4 PORTE INTERNE

Di seguito si riporta il coefficiente di assorbimento delle porte interne e la loro collocazione.

Frequenza [Hz]							
63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
0.37	0.38	0.4	0.46	0.52	0.54	0.54	0.52

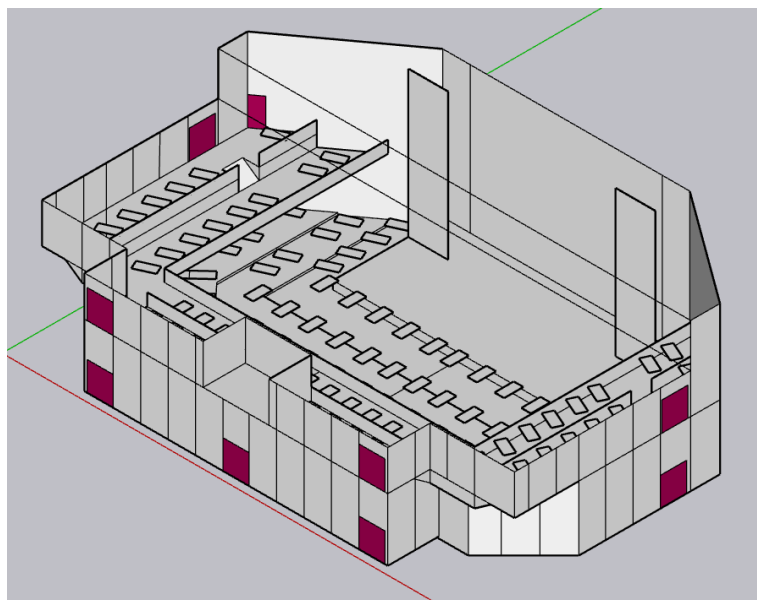


Figura 29 Posizione porte di accesso alla sala

## 9.5 TENDAGGIO IN TESSUTO DRAPPEGGIATO

Nell'immagine seguente (Figura 30) si riportano le superfici che si è ipotizzato di realizzare attraverso l'utilizzo di **TENDAGGIO IN VELLUTO**.

Di seguito si riporta il coefficiente di assorbimento del tendaggio in velluto e la sua collocazione.

Frequenza [Hz]							
63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
0.11	0.21	0.38	0.53	0.44	0.45	0.47	0.48

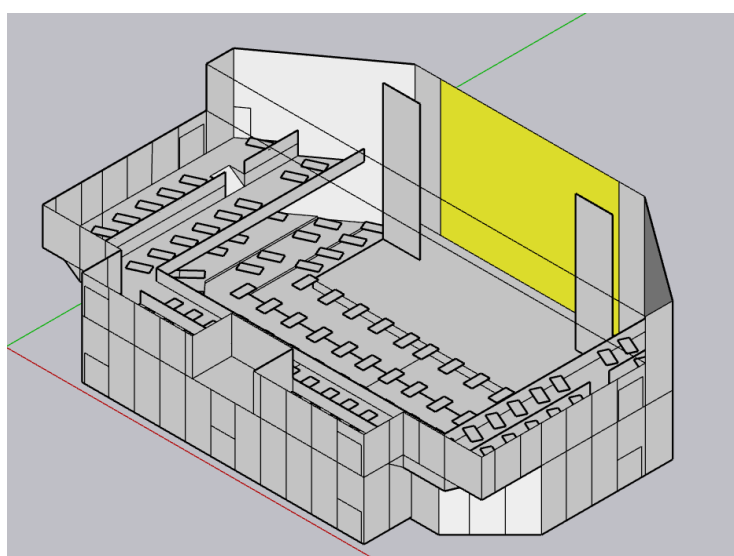


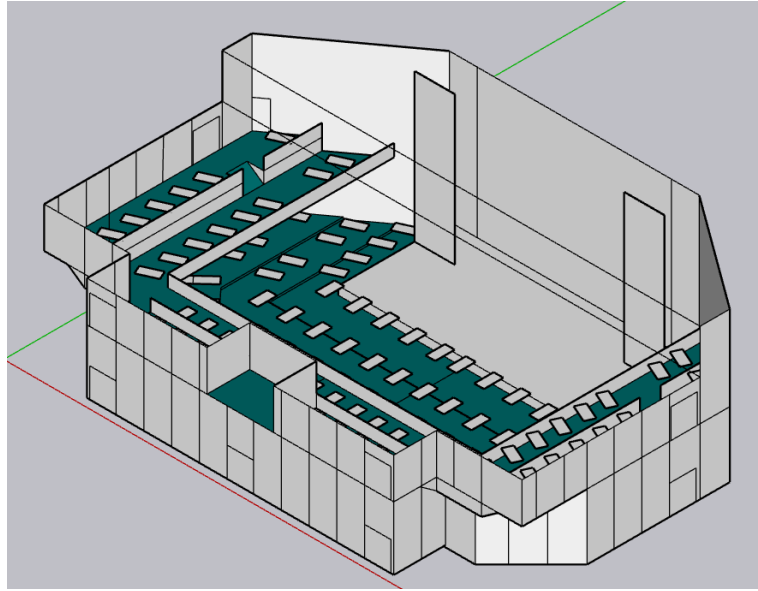
Figura 30 Posizione tendaggio in velluto

## 9.6 PAVIMENTAZIONE IN MOQUETTE

Nell'immagine seguente (Figura 31) si riportano le superfici che si è ipotizzato di realizzare attraverso l'utilizzo di **una pavimentazione in MOQUETTE**.

Di seguito si riporta il coefficiente di assorbimento della pavimentazione in moquette e la sua collocazione.

Frequenza [Hz]							
63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
0.07	0.08	0.12	0.19	0.25	0.3	0.35	0.38



*Figura 31 Pavimentazione in moquette*

## 10. Simulazione ambiente trattato e risultati ottenuti

L'impiego di materiale fonoassorbente così come riportato precedentemente migliora sensibilmente l'acustica del teatro e permette di raggiungere tutti gli obiettivi che ci si era posti a progetto in termini di qualità percettiva e di valori dei descrittori acustici.

Si riportano di seguito i valori dei descrittori acustici calcolati nell'ambiente trattato a confronto con i valori calcolati in ambiente privo di trattamento acustico.

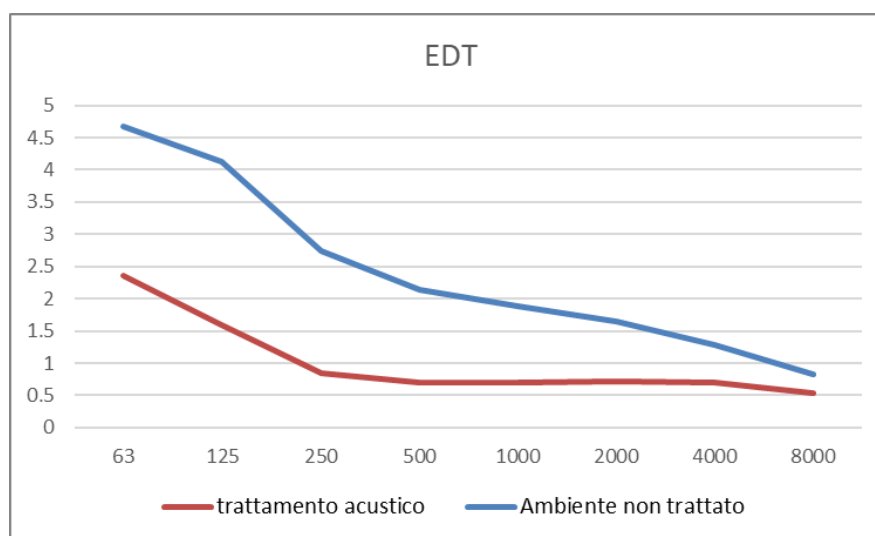


Figura 32- Andamento in frequenza dell'indice EDT (valore medio tra i ricettori)

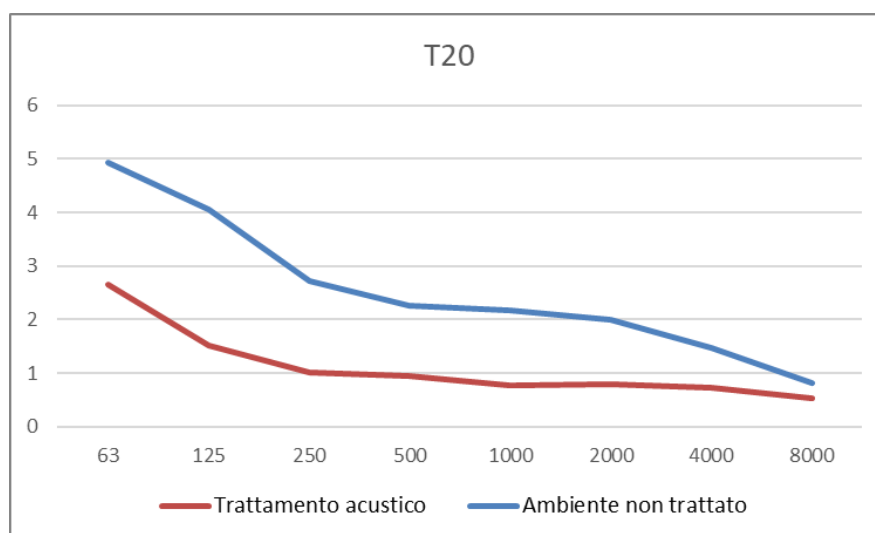


Figura 33- Andamento in frequenza dell'indice T20 (valore medio tra i ricettori)

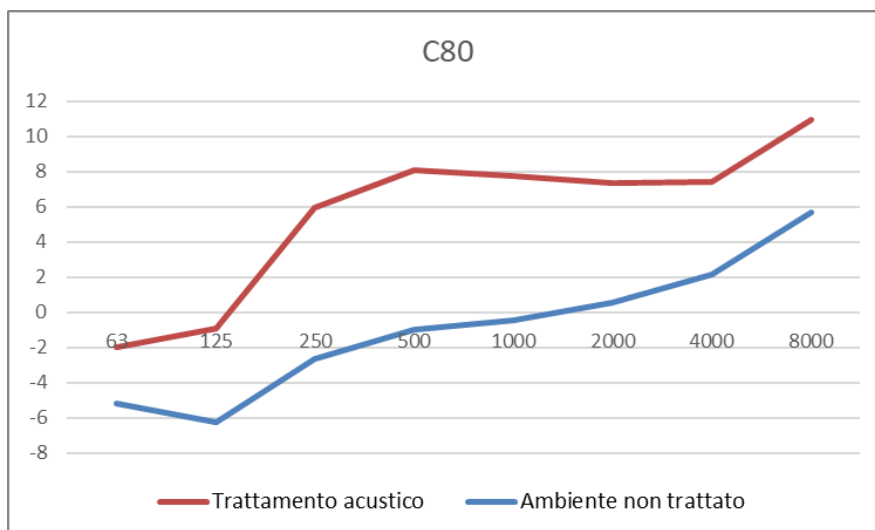


Figura 34- Andamento in frequenza dell'indice C80 (valore medio tra i ricettori)

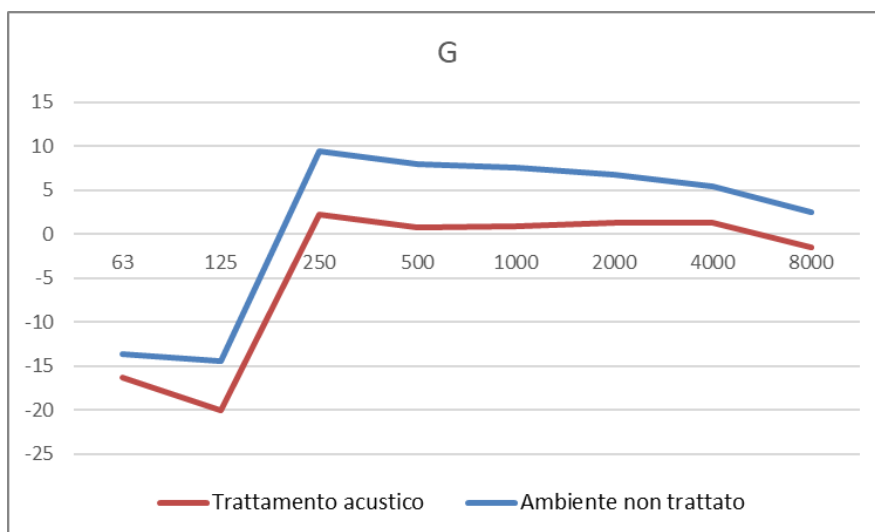


Figura 35- Andamento in frequenza dell'indice G (valore medio tra i ricettori)

I grafici mostrano una sensibile riduzione del T20 e del EDT con una conseguente riduzione della riverberazione percepita. In seguito al trattamento acustico, quindi, la sala mostra dei valori di riverberazione perfettamente in linea con quelli di riferimento presenti in letteratura.

Introducendo materiale fonoassorbente all'interno della sala, parte dell'energia acustica viene assorbita e si riduce l'energia totale presente in ambiente; per questo



motivo, a seguito del trattamento acustico, si registra una leggera riduzione del parametro G. Contenendo il numero e l'entità delle riflessioni e limitando l'energia acustica presente in ambiente migliora però anche l'intelligibilità del parlato e la chiarezza, così come mostrato dal grafico del C80.

Sfruttando l'auralizzazione di Treble è possibile valutare anche a livello percettivo l'efficacia dei trattamenti proposti. Sono state utilizzate per l'auralizzazione sia delle tracce anecoiche di dialogo, per valutare l'intelligibilità del parlato, sia delle tracce anecoiche di musica jazz, provenienti da (4). Dal momento che il teatro verrà destinato prevalentemente alla riproduzione di musica jazz, l'utilizzo di queste tracce anecoiche è stato fondamentale per valutare l'efficacia dei trattamenti previsti in funzione della destinazione d'uso. L'auralizzazione proposta da Treble ha confermato quanto evidenziato dai descrittori acustici: introducendo il trattamento acustico si ottiene un livello equilibrato di riverberazione e una densità di energia sonora in ambiente tale da garantire un buon ascolto in tutti i punti del teatro.

## 11. Confronto tra le simulazioni di Treble e Ramsete nel teatro

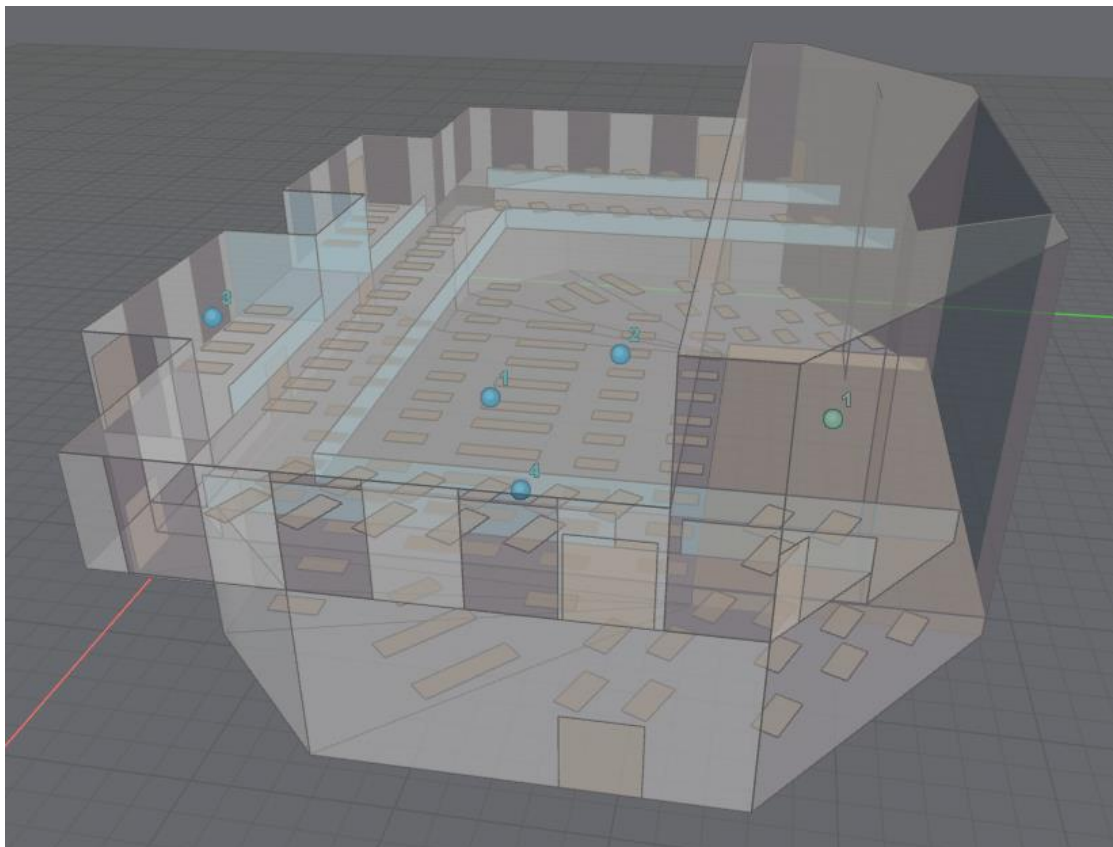
Durante lo sviluppo del progetto acustico del teatro, il software Treble ha dimostrato grandi potenzialità e si è dimostrato un ottimo strumento per la progettazione acustica di spazi chiusi. Il sistema cloud-based e la user experience ottimale, assieme al modello di calcolo ibrido wave-based + ray tracing già citato in precedenza sono i punti di forza principali e lo rendono un software di simulazione acustica estremamente competitivo rispetto alle alternative presenti sul mercato.

La Treble Technologies è stata fondata nel 2020 dal Dr. Finnur Pind e Jesper Pedersen. Al momento della scrittura di questa tesi il software risulta quindi piuttosto recente e inoltre, è in costante evoluzione; a cadenza circa bimestrale, infatti, vengono rilasciati aggiornamenti che ampliano le potenzialità del software e le sue funzionalità.

I software di simulazione acustica sono diffusi ormai da diversi anni e in commercio ne esistono molti. Ciascuno di essi ha delle peculiarità, ma tutti quanti condividono un'unica finalità: affiancare il progettista acustico nelle scelte progettuali e fornire tutti gli strumenti utili alla valutazione e all'analisi dei risultati.

Poiché risulta di grande interesse valutare in modo oggettivo il valore del software Treble e del suo solutore ibrido, si è scelto di operare un confronto tra due software di simulazione diversi, rapportando i risultati di simulazione ottenuti con Treble con quelli ottenuti con Ramsete. Il confronto tra Treble e Ramsete è stato svolto in primis prendendo come caso studio il teatro (a seguito del trattamento acustico) e successivamente prendendo come caso studio un ambiente già edificato, l'aula 1T del Politecnico di Torino. Si è scelto di operare il confronto anche sull'aula 1T poiché di questo ambiente si posseggono delle misure acustiche effettuate in loco che possono rappresentare un ottimo metro di paragone per confrontare i risultati dei due software.

Il confronto tra Treble e Ramsete sul teatro è stato svolto scegliendo come scenario l'ambiente trattato acusticamente, secondo la soluzione progettuale proposta. Di questo ambiente è stata effettuata una simulazione mediante Ramsete, riproducendo in modo analogo quanto fatto precedentemente con Treble (Figura 36). In Tabella 1 sono riportati i coefficienti di assorbimento dei materiali, in Tabella 2 sono mostrate le posizioni di sorgenti e ricevitori (comuni ai due software), mentre in Tabella 3 sono mostrati i parametri di simulazione dei due software.



*Figura 36 Modello CAD del teatro*

	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Stage floor	0.31	0.3	0.28	0.23	0.16	0.1	0.07	0.04
BASWA Phon Base	0.29	0.35	0.73	0.89	0.84	0.82	0.75	0.7
SKEMA AKUSTIKA	0.17	0.37	0.59	0.67	0.65	0.56	0.47	0.6
Smooth painted concrete	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Wool pile on concrete	0.07	0.08	0.12	0.19	0.25	0.3	0.35	0.38
Wood	0.02	0.02	0.03	0.04	0.08	0.15	0.2	0.22
Acoustic door	0.37	0.38	0.4	0.46	0.52	0.54	0.54	0.52
Single pane of glass	0.13	0.08	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03
Heavy velour draped to half area	0.11	0.21	0.38	0.53	0.44	0.45	0.47	0.48

Tabella 1 Coefficienti di assorbimento dei materiali

Posizione	x	y	z
S1	17	20	2
R1	17	8	1.8
R2	12	12	1.65
R3	23	1	6.7
R4	30	12	5.8

Tabella 2 Posizione di sorgenti e ricevitori – Teatro

Parametri di simulazione	Ramsete	Treble
source power	110 dB	110 dB
source	omni	omni
durata IR	2	2
frequenza di campionamento	48000 Hz	32000 Hz
frequenza di transizione	-	177 Hz
ordine delle sorgenti	-	2
immagine	-	10000
Numero di raggi	-	-
level	10	-
time resolution	0.001	-
history	time dependant	-
humidity	50	-
temperature	20	-
alfa	2	-
beta	0.1	-
diffraction level	2	-
diffusion	on	-
randomise after	4	-

Tabella 3 Parametri delle simulazioni di Treble e Ramsete - Teatro

Una volta effettuate le simulazioni acustiche nei due software, l'elaborazione e il confronto dei risultati è avvenuto nel seguente modo:

1. esportazione delle risposte all'impulso (IR), calcolate nei vari ricettori;
2. calcolo dei parametri acustici partendo dalle IR e confronto tra i valori ottenuti da Treble e Ramsete;
3. calcolo dello spettro in frequenza delle IR di Treble e Ramsete e confronto.

Le risposte all'impulso ottenute con le due simulazioni sono state processate con il software Matlab, mediante il toolbox ITA, sviluppato dall'Institute of Technical Acoustics della RWTH Aachen University (5). In questo modo è stato possibile calcolare i valori dei descrittori acustici partendo dalle IR dei vari ricettori e ottenere i valori medi in ambiente e le corrispondenti deviazioni standard. Questa procedura è stata applicata sia per le IR ottenute con Treble sia per quelle ottenute con Ramsete e i valori ottenuti dei parametri acustici sono stati posti a confronto su dei grafici che ne mostrano l'andamento in frequenza. I grafici mostrano anche la Just Noticeable Difference (JND), cioè il range oltre al quale una differenza nei parametri acustici risulta evidente a livello percettivo; in questo modo si può valutare se le differenze che si riscontrano tra i valori di Treble e Ramsete sono significative o meno.

## 11.1 Calcolo dei parametri acustici

Di seguito si riportano i grafici che mostrano l'andamento in frequenza dei parametri acustici ottenuti partendo dalle risposte all'impulso di Treble e Ramsete.

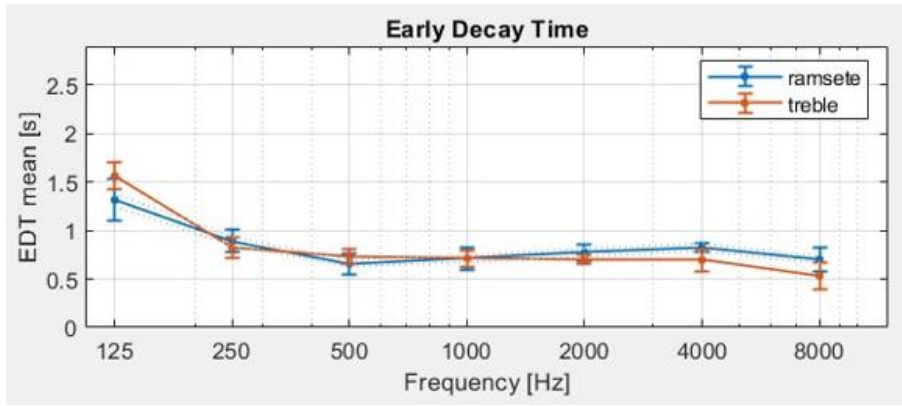


Figura 37 Confronto tra i valori di EDT medi calcolati partendo da Ramsete e da Treble

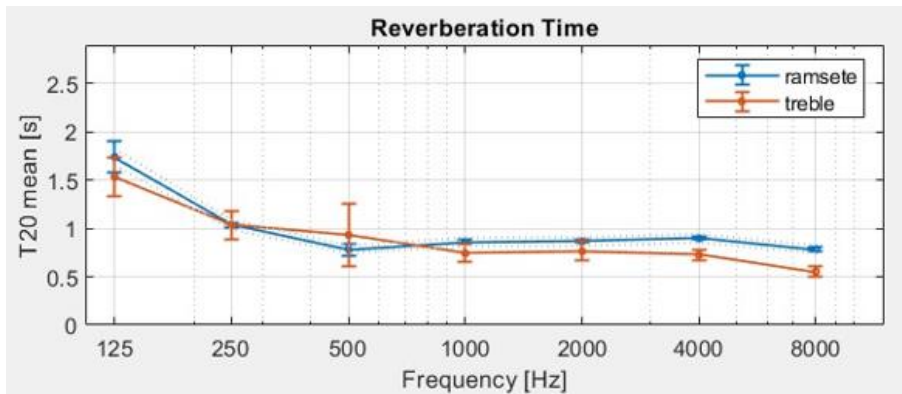


Figura 38 Confronto tra i valori di T20 medi calcolati partendo da Ramsete e da Treble

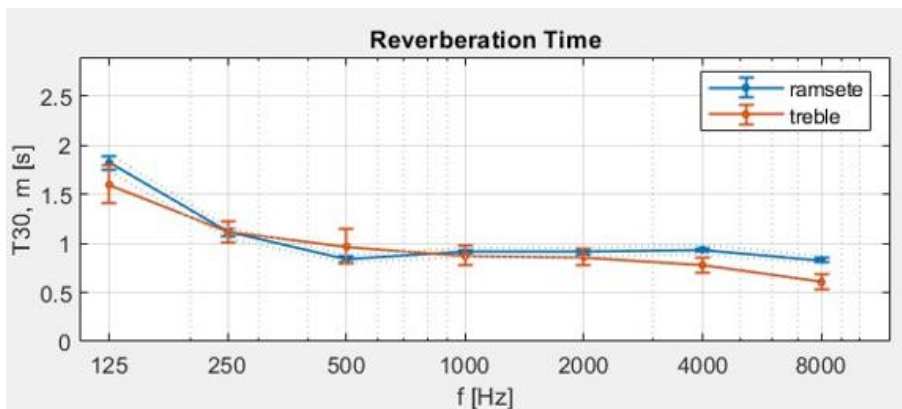


Figura 39 Confronto tra i valori di T30 medi calcolati partendo da Ramsete e da Treble

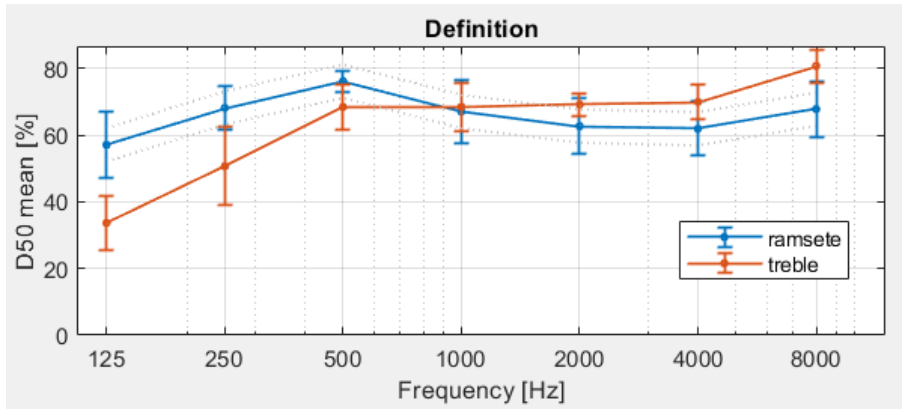


Figura 40 Confronto tra i valori di D50 medi calcolati partendo da Ramsete e da Treble

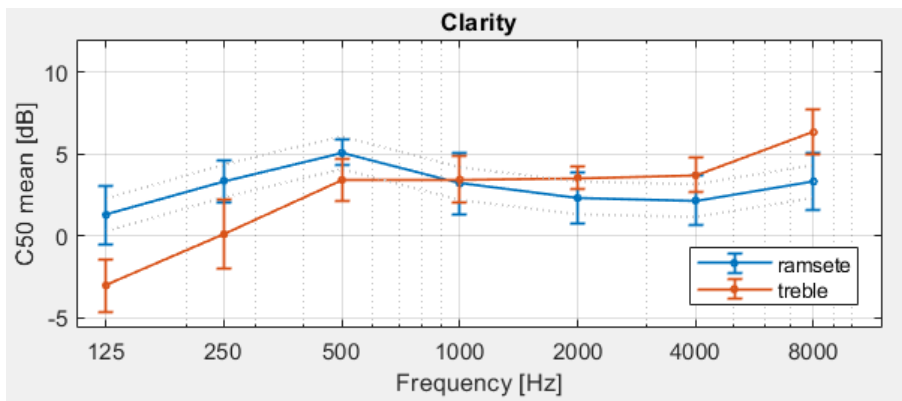


Figura 41 Confronto tra i valori di C50 medi calcolati partendo da Ramsete e da Treble

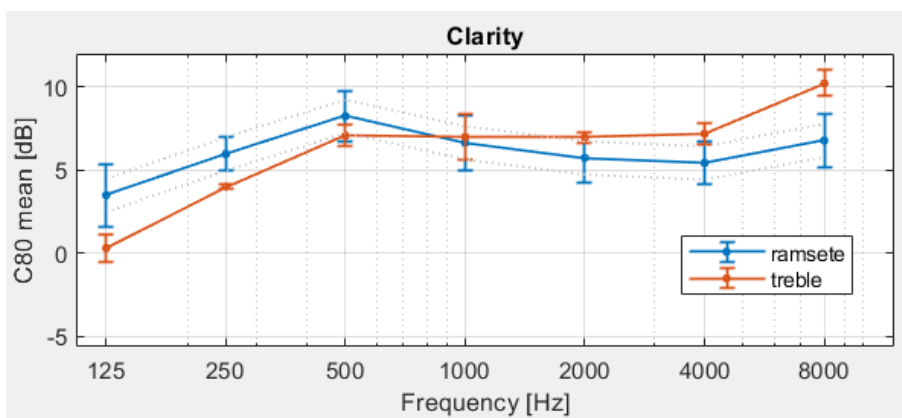


Figura 42 Confronto tra i valori di C80 medi calcolati partendo da Ramsete e da Treble

I risultati mostrano una buona corrispondenza tra Treble e Ramsete per quanto riguarda gli indici EDT, T20 e T30. Le frazioni energetiche, invece, mostrano una maggiore differenza tra Treble e Ramsete, specialmente alle basse frequenze; questa differenza è riconducibile probabilmente al diverso metodo di calcolo utilizzato dai due software per simulare questo range di frequenza. I parametri di chiarezza e definizione sono inoltre fortemente dipendenti dalla posizione e per questo i valori ottenuti, mediati tra tutti i ricettori, sono caratterizzati da barre di errore più ampie. Nel complesso le differenze tra i valori ottenuti con Treble e quelli ottenuti con Ramsete sono minime, dato che sono sempre contenute all'interno della JND oppure la eccedono di poco. Le simulazioni di Treble e Ramsete si possono quindi considerare del tutto paragonabili per quanto riguarda il calcolo dei descrittori acustici.

## 11.2 Calcolo delle risposte in frequenza

Analogamente a quanto fatto per il calcolo dei descrittori acustici, è stato impiegato il software Matlab per calcolare gli spettri in frequenza partendo dalle risposte all'impulso e per generare dei grafici di confronto tra i valori di Treble e Ramsete per ogni ricettore. A titolo di esempio si mostrano in Figura 43 e in Figura 44 le risposte in frequenza di Treble e Ramsete calcolate nei ricettori R1 e R4.

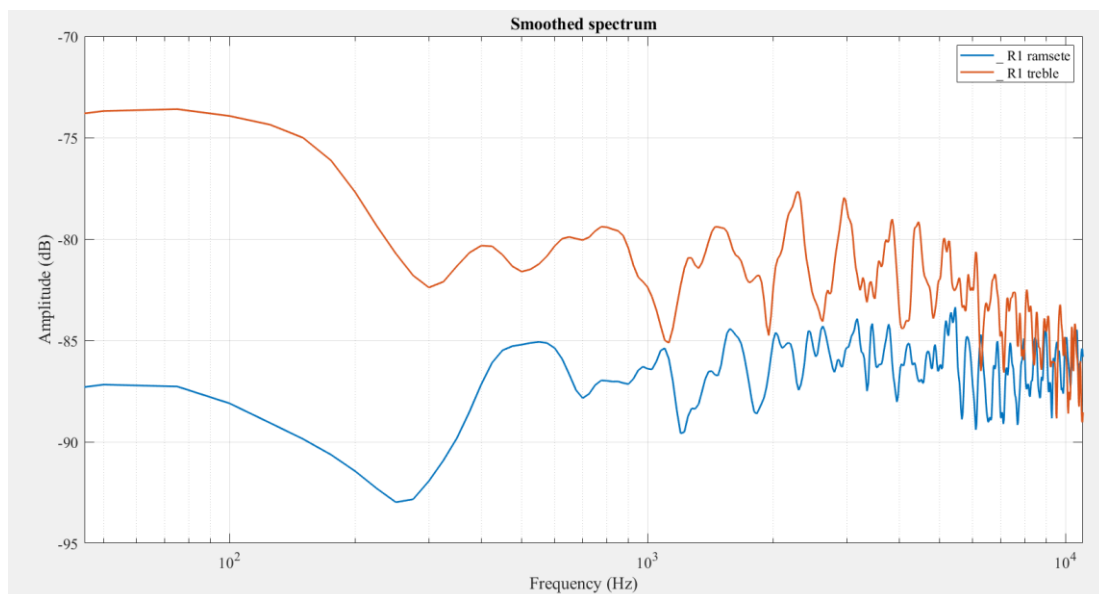


Figura 43 Risposta in frequenza calcolata nel ricettore R1



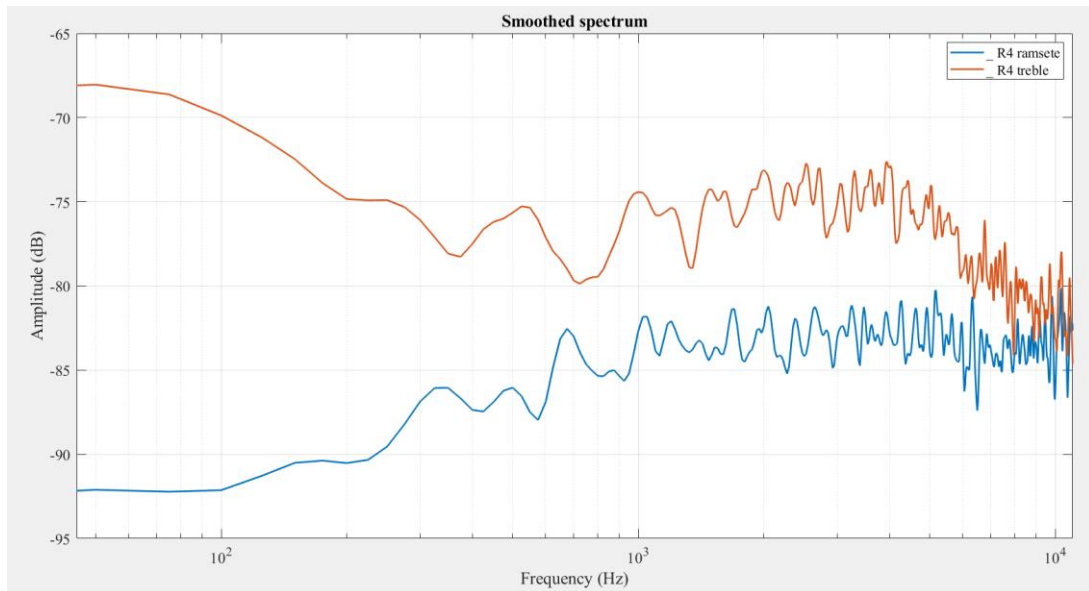


Figura 44 Risposta in frequenza calcolata nel ricettore R4

Il confronto tra gli spettri in frequenza di Treble e Ramsete mostra in generale una buona corrispondenza. Nei grafici in Figura 43 e Figura 44 si può notare come i due software descrivano picchi e avvallamenti della risposta in frequenza in modo molto simile. Le uniche differenze si riscontrano negli estremi di banda, dove i due software differiscono maggiormente. In particolar modo Ramsete sembra sottostimare significativamente il contributo energetico alle basse frequenze rispetto a Treble.

Successivamente è stata effettuata un'ulteriore analisi sulle risposte all'impulso ottenute dai due software di simulazione, per valutare se ci sono similitudini.

In Figura 45 sono riportati i grafici di confronto tra le risposte all'impulso calcolate con i due software di simulazione. Sono riportati a scopo esemplificativo i grafici delle risposte all'impulso del ricevitore R1, nell'intervallo di tempo compreso tra i primi 50 ms, che caratterizza la componente diretta del suono.

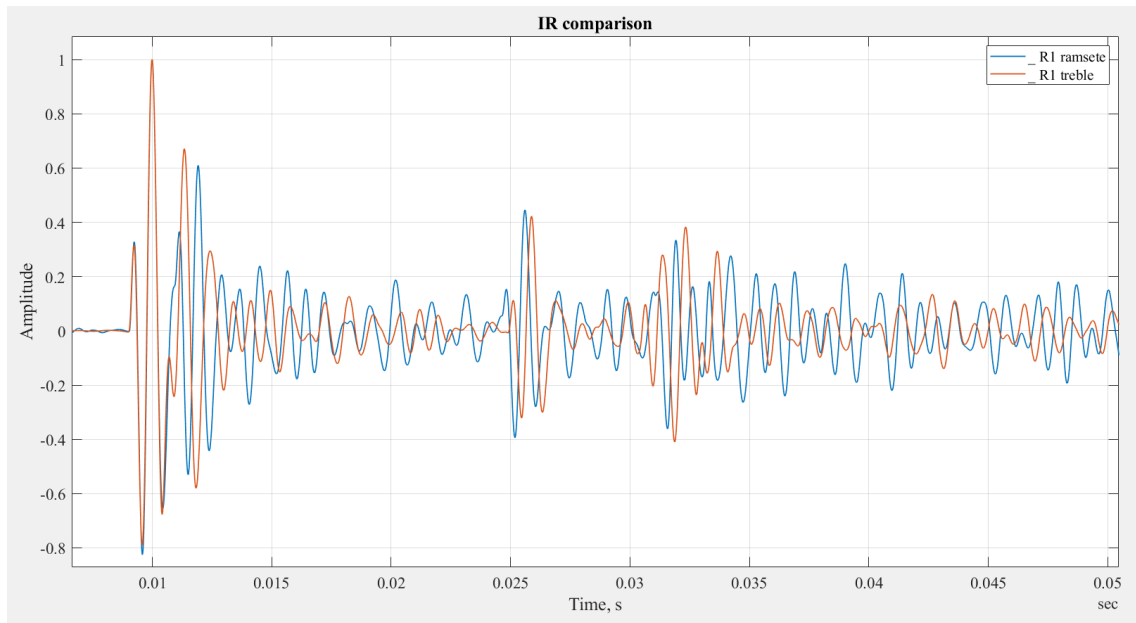


Figura 45 Confronto Treble-Ramsete, filtro a 20Hz, ricevitore R1

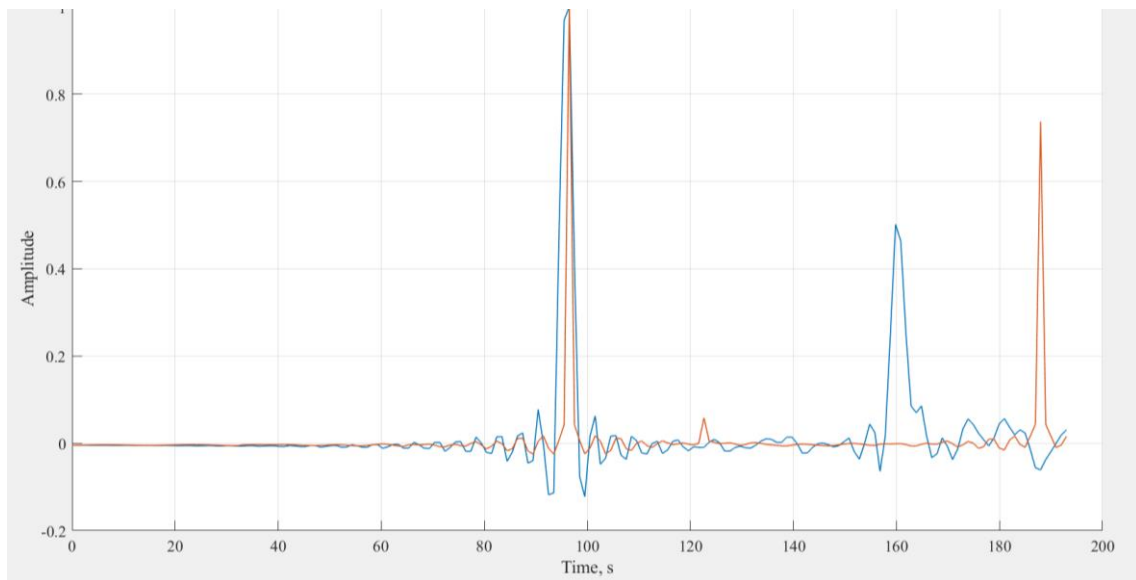


Figura 46 Confronto Treble-Ramsete, componente diretta del suono, ricevitore R1

Come mostrano i grafici precedenti, le risposte all'impulso di Ramsete e Treble risultano coincidenti solo in parte. La corrispondenza tra le due curve è limitata ai primi ms, dopo di che le curve risultano incoerenti.

## 12. Confronto tra le simulazioni di Treble e Ramsete e i dati misurati in un ambiente reale

Successivamente al confronto tra Treble e Ramsete effettuato nel teatro, si è scelto di operare un confronto analogo anche prendendo come caso studio l'aula 1T del Politecnico di Torino. Si tratta di un ambiente di circa 100 m<sup>2</sup> con una struttura a parallelepipedo e con un'altezza media di circa 9 m. Trattandosi di un ambiente più piccolo rispetto al teatro e di forma più regolare, si può valutare se i due software di simulazione si comportano in modo differente al variare delle caratteristiche geometriche del caso in esame. Inoltre, di questo ambiente sono già disponibili delle risposte all'impulso ottenute mediante delle misure acustiche in loco che possono rappresentare un ottimo metro di paragone per confrontare i risultati dei due software.

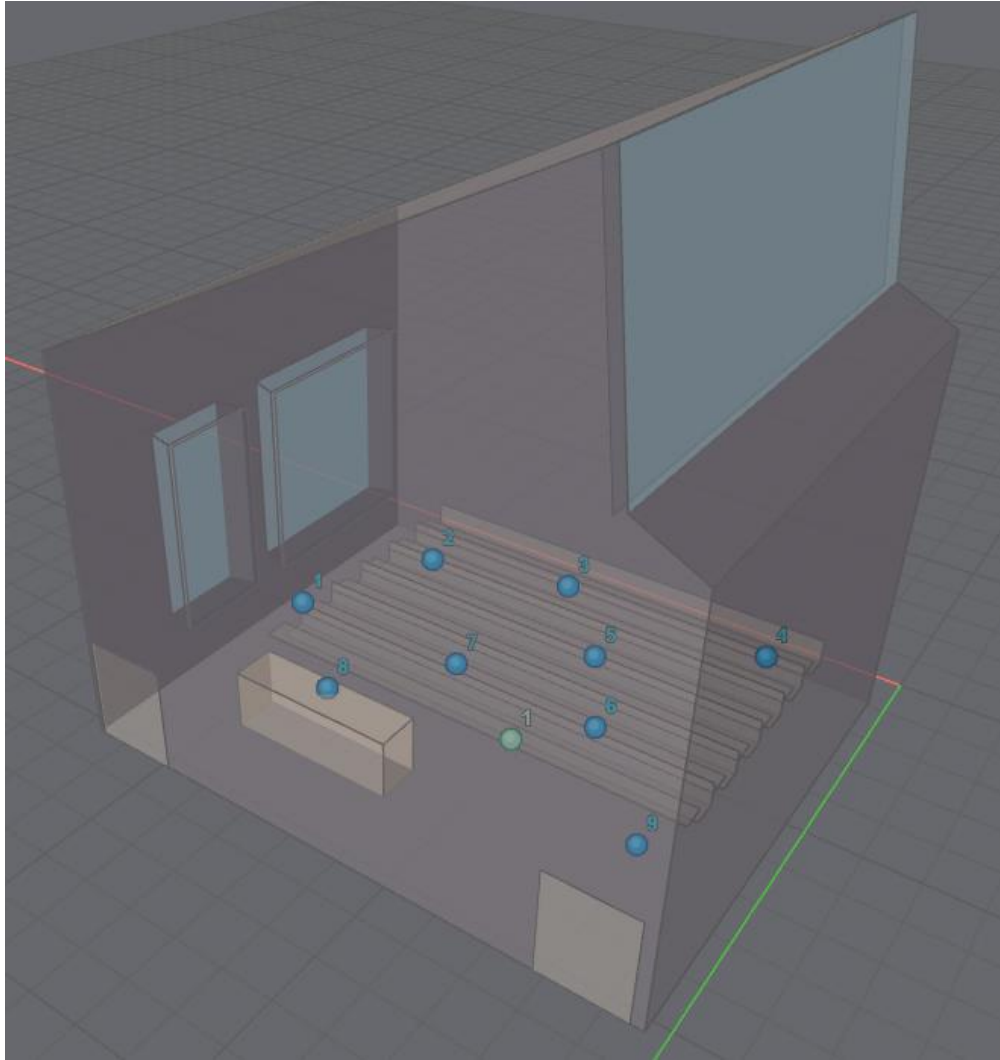


Figura 47 Modello CAD Aula 1T

Nell'aula 1T non è presente alcun trattamento acustico con materiale fonoassorbente e vari materiali con i rispettivi coefficienti di assorbimento sono riportati nella Tabella 4.

		63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
vetro	Window glass	0.4	0.34	0.25	0.17	0.11	0.07	0.05	0.04
sedute	Wooden chairs	0.05	0.06	0.08	0.1	0.11	0.12	0.12	0.12
porte	Acoustic door	0.37	0.38	0.4	0.46	0.52	0.54	0.54	0.52
pavimento	Linoleum or vinyl on concrete	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
scrivania	Wood	0.02	0.02	0.03	0.04	0.08	0.15	0.2	0.22
soffitto	Wood panel with air space behind	0.34	0.3	0.25	0.2	0.17	0.14	0.1	0.07
tende	light velour hung straight in contact with wall	0.02	0.04	0.07	0.11	0.18	0.28	0.36	0.4
pareti	<b>treble</b>	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.1	0.1
	<b>ramsete</b>	0.08	0.07	0.05	0.04	0.04	0.09	0.15	0.3

Tabella 4 Valori di assorbimento acustico dei materiali impiegati nelle simulazioni

Le risposte all'impulso reali dell'ambiente sono state ottenute mediante delle misurazioni, effettuate con un array microfonico Zylia e una sorgente dodecaedrica Brüel & Kjær tipo 4296. Su quest'ultima era stata effettuata precedentemente una caratterizzazione in camera anecoica e in camera riverberante e si disponeva già dei valori di potenza sonora in frequenza, mostrati in Figura 48.

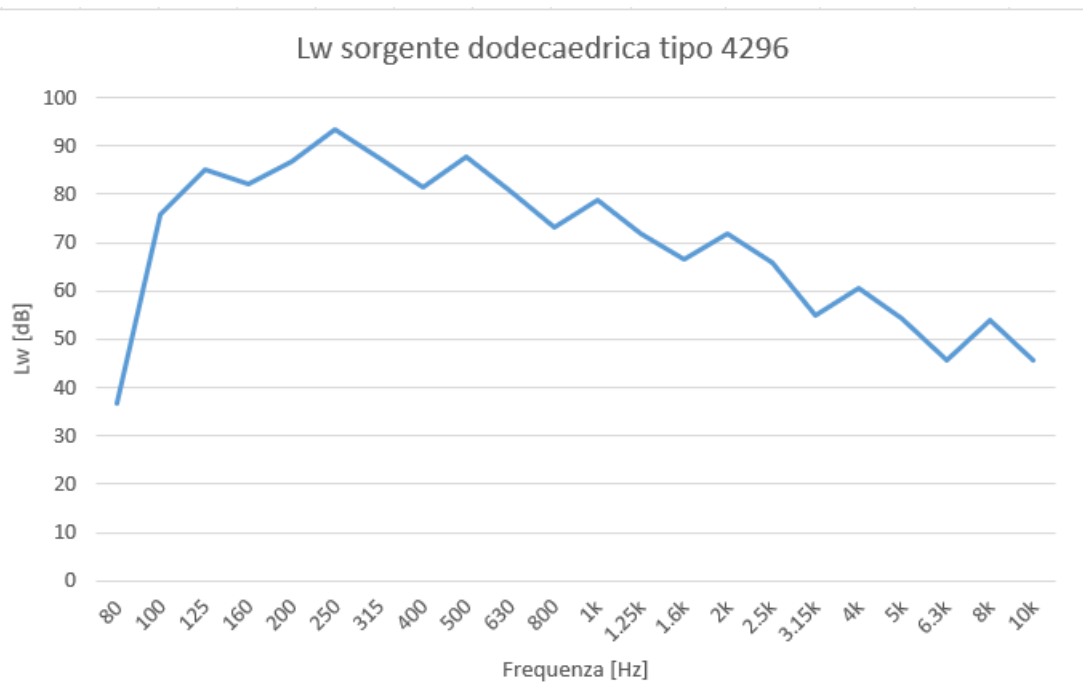


Figura 48 Caratterizzazione sorgente Brüel & Kjær tipo 4296

Poiché la risposta in frequenza della sorgente utilizzata per le misure non è lineare si è scelto di operare un'equalizzazione sulle risposte all'impulso misurate per compensare questo effetto e renderle comparabili con le risposte all'impulso ottenute dalle simulazioni. Nelle simulazioni, infatti, le sorgenti sono state impostate come omnidirezionali e con una risposta lineare in frequenza. La curva di equalizzazione scelta per la correzione è mostrata in Figura 49 ed è stata applicata sistematicamente a tutti i file di risposta all'impulso misurati prima delle analisi.

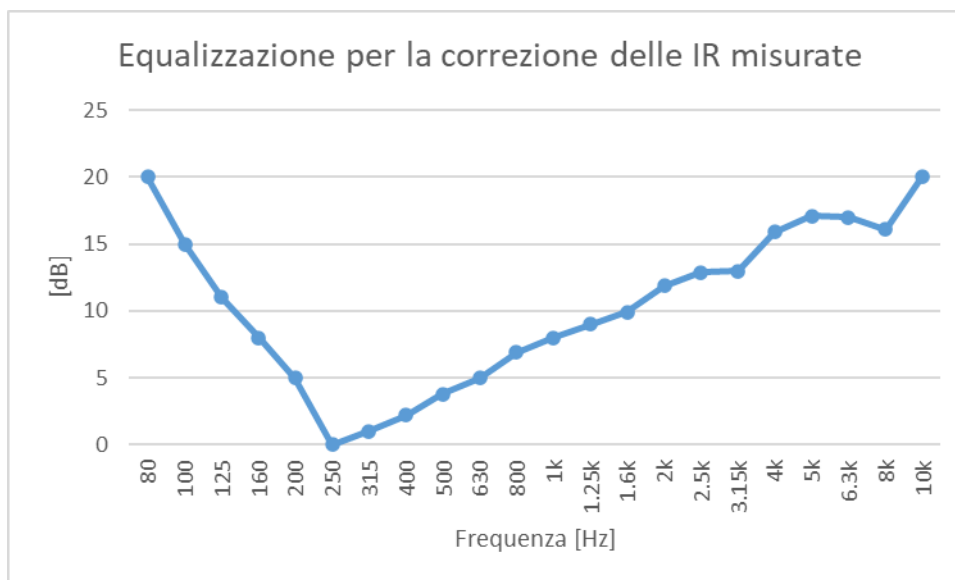


Figura 49

Successivamente l'ambiente è stato simulato sia con Treble sia con Ramsete e i risultati ottenuti sono stati confrontati con quanto ottenuto dalle misurazioni acustiche effettuate in loco. Le posizioni di sorgenti e ricevitori (comuni a misure e simulazioni) sono riportate in Tabella 5.

Le condizioni di simulazione, che rappresentano in modo fedele come sono state svolte le misurazioni, sono riportate in Tabella 5.

Posizione	x	y	z
S1	4.41	7.46	1.5
R1	10.16	6.06	1.2
R2	8.99	3.22	1.2
R3	6.19	2.42	1.2
R4	2	2.31	1.2
R5	4.59	4.2	1.2
R6	3.58	6.01	1.2
R7	6.55	5.93	1.2
R8	7.94	8.01	1.2
R9	1.68	8.12	1.2

Tabella 5 Posizione di sorgenti e ricevitori – Aula 1T

Parametri di simulazione	Ramsete	Treble
source power	110 dB	110 dB
source	omni	omni
durata IR	4	4
frequenza di campionamento	48000 Hz	32000 Hz
frequenza di transizione	-	224 Hz
ordine delle sorgenti immagine	-	2
Numero di raggi	-	10000
level	10	-
time resolution	0.001 s	-
history	time dependant	-
humidity	50	-
temperature	20 °C	-
alfa	2	-
beta	0.1	-
diffraction level	2	-
diffusion	on	-
randomise after	4	-

*Tabella 6 Parametri delle simulazioni di Treble e Ramsete – Aula 1T*

## 12.1 Calcolo dei parametri acustici

Le risposte all'impulso ottenute con le misurazioni e i parametri acustici da esse ricavati sono stati utilizzati come metro di paragone per valutare la bontà delle simulazioni. Dai due software, una volta eseguite le simulazioni acustiche, sono state esportate le rispettive risposte all'impulso calcolate nei vari ricettori. Successivamente, mediante il software Matlab, sono stati calcolati i parametri acustici dell'ambiente partendo dalle risposte all'impulso nei tre diversi scenari (misure, Ramsete e Treble). Questi sono poi stati riportati su dei grafici sotto forma di valori medi e deviazioni standard, per consentirne il confronto e l'analisi. I

risultati ottenuti sono riportati nelle figure seguenti (Figura 50, Figura 51, Figura 54).

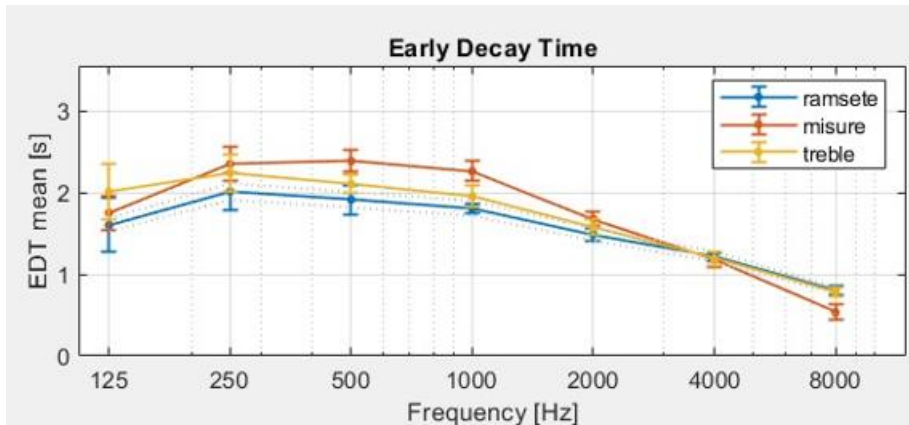


Figura 50 Confronto tra i valori di EDT medi calcolati partendo dalle misure, da Ramsete e da Treble

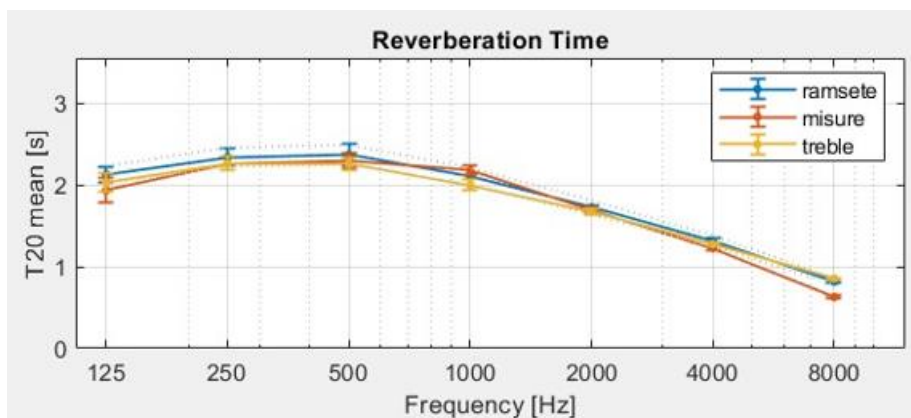


Figura 51 Confronto tra i valori di T20 medi calcolati partendo dalle misure, da Ramsete e da Treble

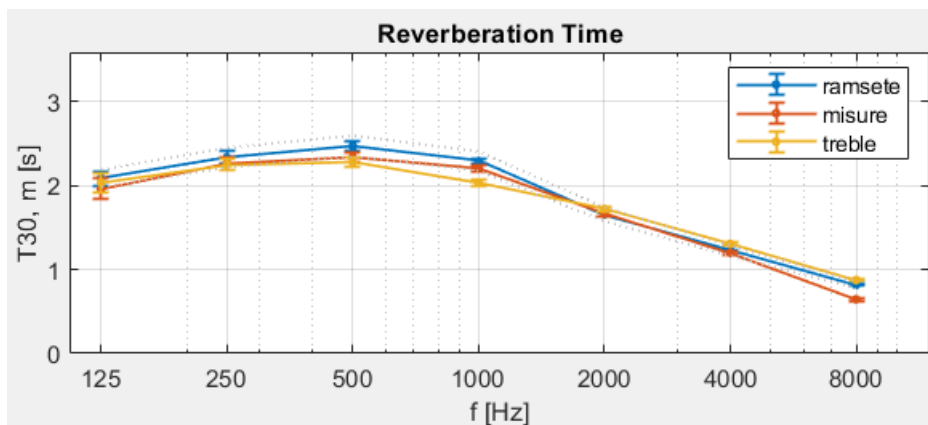


Figura 52 Confronto tra i valori di T30 medi calcolati partendo dalle misure, da Ramsete e da Treble



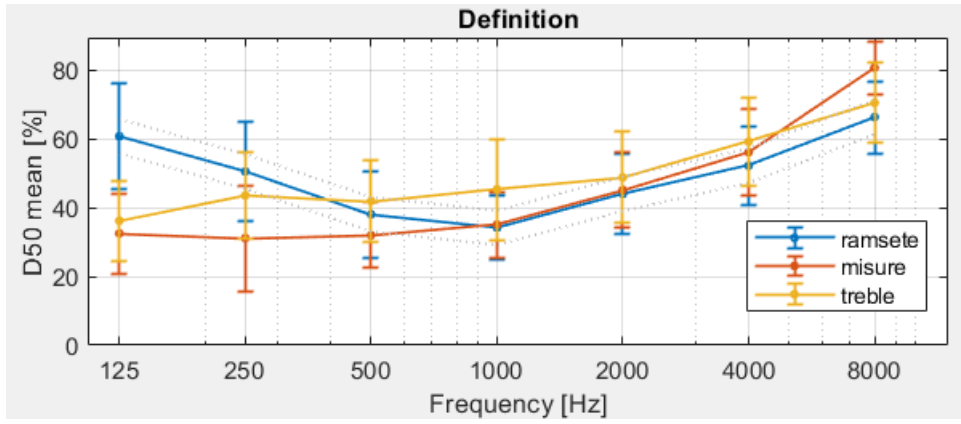


Figura 53 Confronto tra i valori di D50 medi calcolati partendo dalle misure, da Ramsete e da Treble

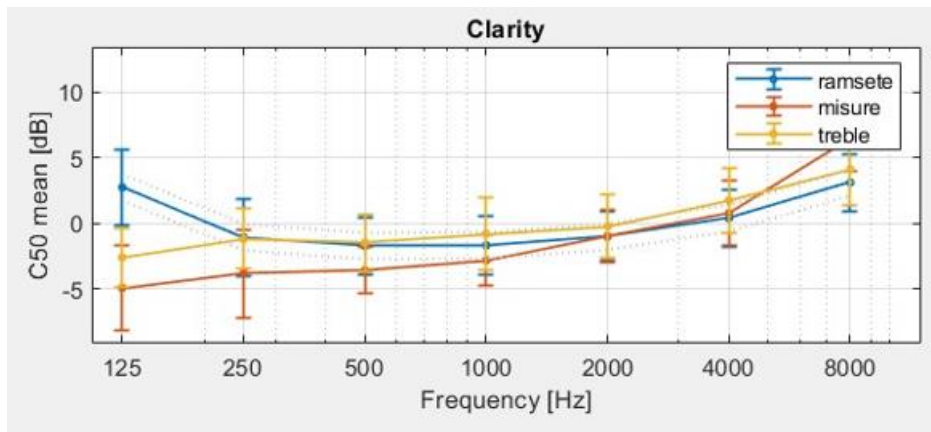


Figura 54 Confronto tra i valori di C50 medi calcolati partendo dalle misure, da Ramsete e da Treble

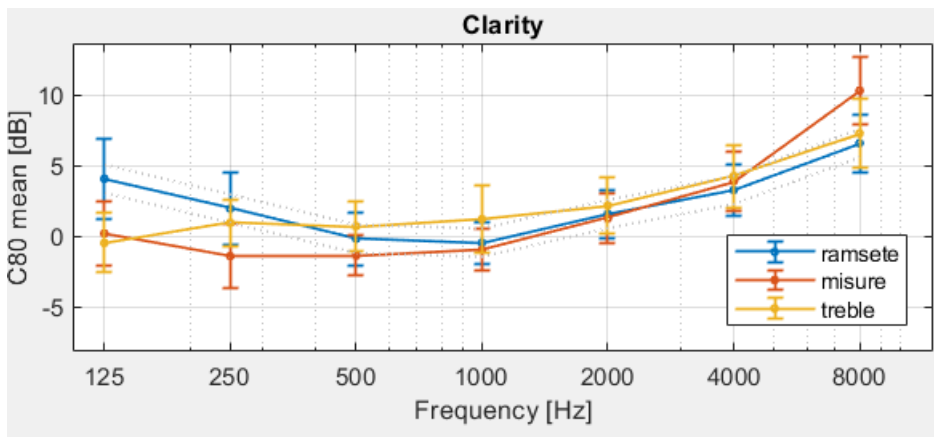


Figura 55 Confronto tra i valori di C80 medi calcolati partendo dalle misure, da Ramsete e da Treble

Similmente a quanto riscontrato nel teatro, i grafici mostrano un'ottima corrispondenza nei valori degli indici di riverberazione T20 e T30 e una maggiore variabilità nei valori delle frazioni energetiche C50, C80 e D50. Nel complesso, il confronto effettuato sui parametri acustici mostra una buona corrispondenza tra i valori ottenuti dalle simulazioni e i valori ottenuti dalle misure, evidenziando come sia Treble che Ramsete descrivano in modo fedele il reale comportamento acustico della stanza.

## 12.2 Calcolo risposte in frequenza

Analogamente a quanto fatto per il calcolo dei descrittori acustici, è stato impiegato il software Matlab per calcolare gli spettri in frequenza partendo dalle risposte all'impulso e per generare dei grafici di confronto tra i valori di Treble, Ramsete e delle misure per ogni ricevitore. A titolo di esempio si mostrano in Figura 56, Figura 57, Figura 58 e Figura 59 le risposte in frequenza di Treble e Ramsete e delle misure calcolate nei ricevitori R1, R2, R4 e R5.

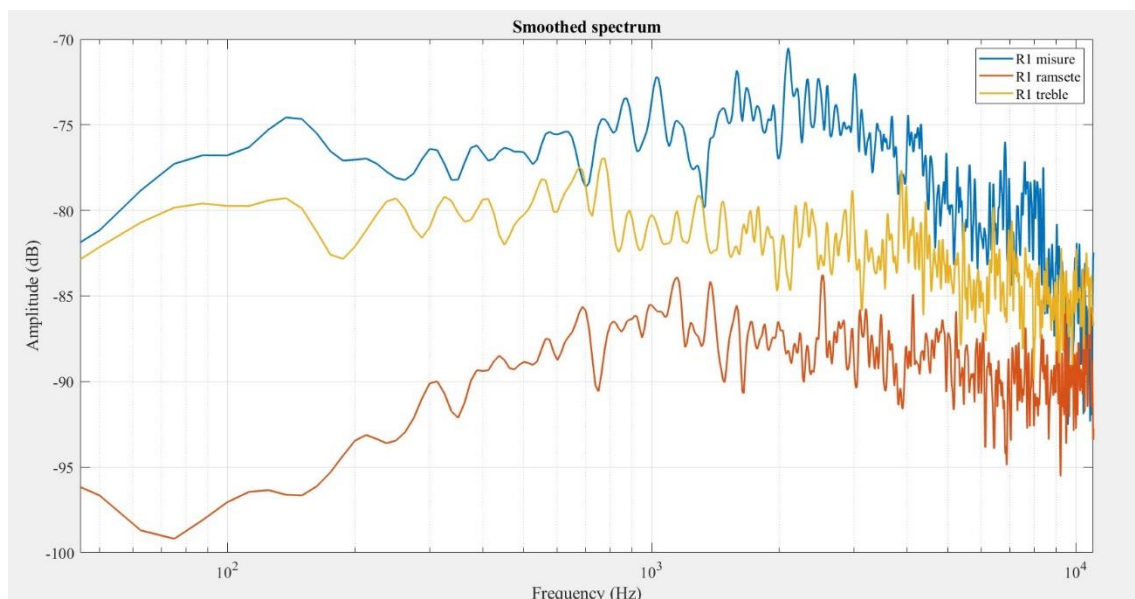


Figura 56 Risposta in frequenza calcolata nel ricevitore R1

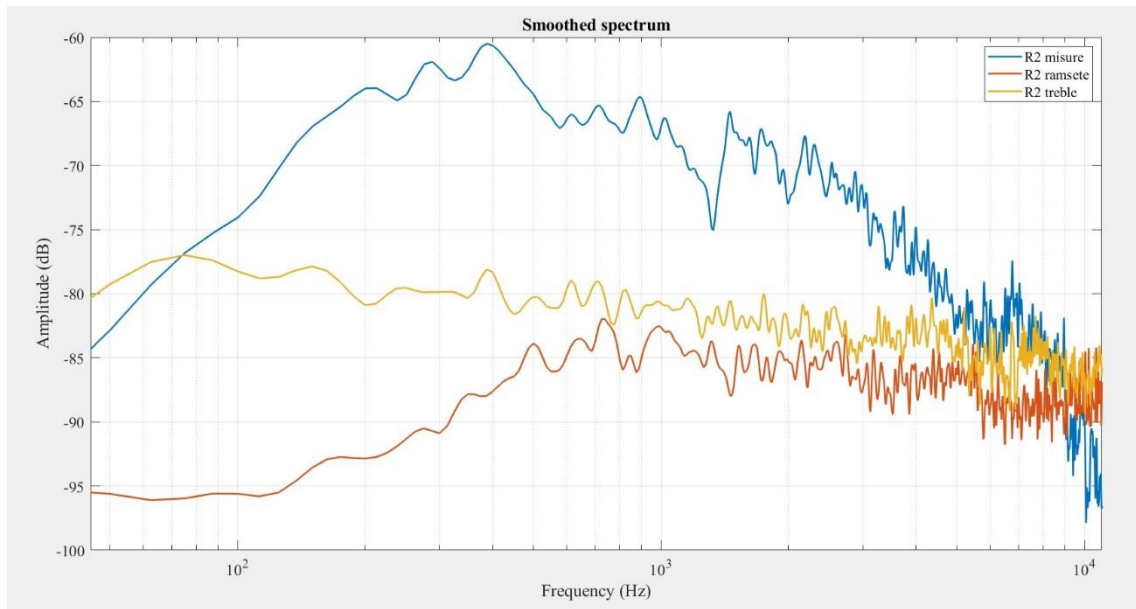


Figura 57 Risposta in frequenza calcolata nel ricevitore R2

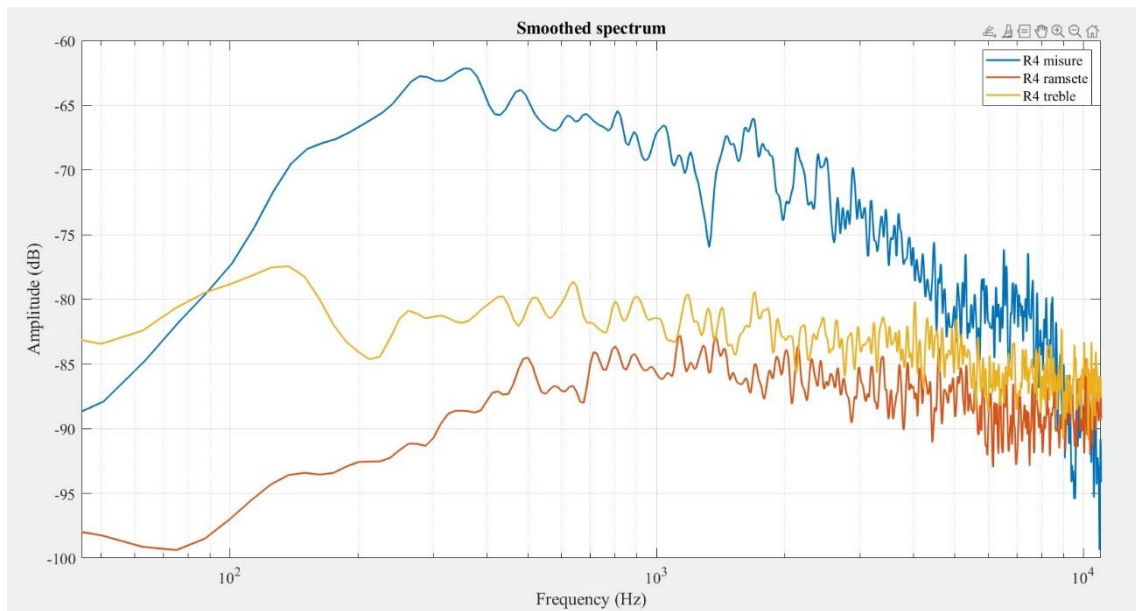


Figura 58 Risposta in frequenza calcolata nel ricevitore R4

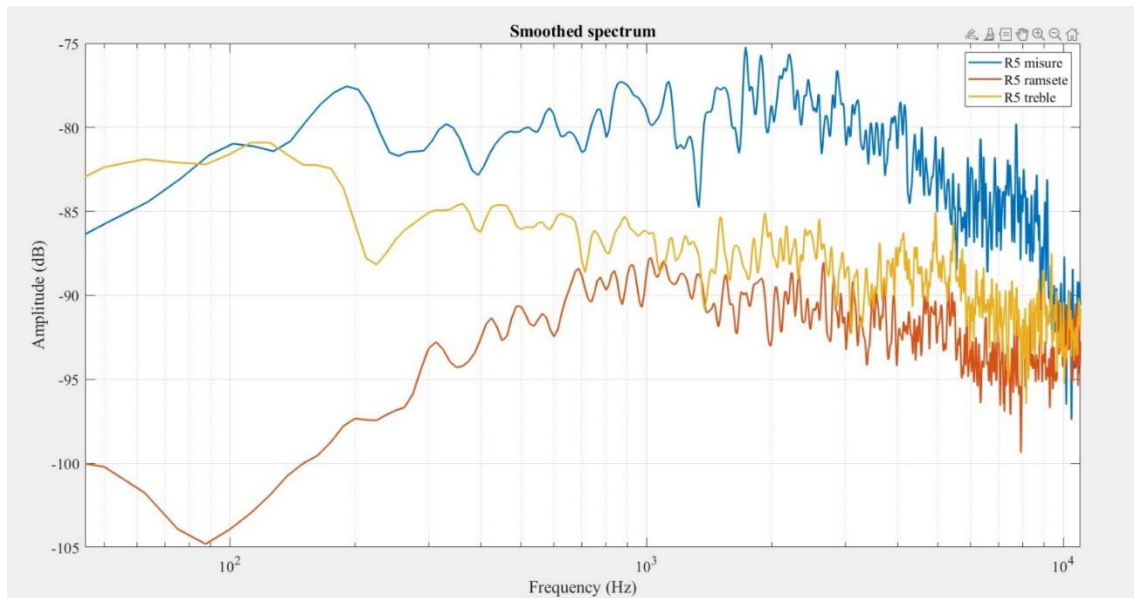


Figura 59 Risposta in frequenza calcolata nel ricevitore R5

Il confronto tra le risposte in frequenza di Ramsete, Treble e misure mostra una buona corrispondenza tra le simulazioni ma delle differenze significative tra le simulazioni e le misure. In particolare, se si osserva il comportamento di Ramsete alle basse frequenze nei diversi ricettori si nota come sistematicamente il contributo energetico di questo range di frequenze venga sottostimato. Treble, d'altra parte, tende talvolta a sovrastimare il contributo delle basse frequenze, generando come, Ramsete, una risposta in frequenza differente da quella delle misure.

## 13. Test soggettivi in ASL

Le analisi effettuate sul Teatro e sull'aula 1T del Politecnico hanno messo in evidenza che i due software di simulazione analizzati portano a risultati simili e coerenti con le misure per quanto riguarda i descrittori acustici, mentre portano a risultati maggiormente diversi tra loro per quanto riguarda l'analisi della risposta in frequenza.

Per approfondire il confronto tra Ramsete e Treble e tra i due software e le misure si è scelto di operare anche un confronto di tipo soggettivo, mediante un test percettivo di ascolto. In questo modo è possibile valutare se le differenze identificate con l'analisi sulle risposte all'impulso sono percepibili anche all'ascolto e quindi significative per esprimere un giudizio sulla verosimiglianza delle simulazioni alla realtà.

Il test percettivo che si è scelto è il Two Interval, Two Alternative, Forced Choice Test (2I/2AFC) ed è stato effettuato prendendo come caso studio l'aula 1T del Politecnico.

Il test richiede di ascoltare diversi campioni audio, presentati a gruppi di tre, e di rispondere ad alcune domande riguardanti quanto viene percepito. I campioni in questione contengono delle auralizzazioni di file anecoici ottenute partendo dalle risposte all'impulso delle misure e delle simulazioni di Treble e Ramsete. Al soggetto che effettua il test vengono proposti ogni volta tre file audio: A, B e X; i file A e B sono diversi mentre il file X è identico ad A o B. Il soggetto deve innanzitutto valutare se  $X=A$  o  $X=B$  e poi esprimere una valutazione soggettiva delle differenze percepite tra A e B. Questa serie di quesiti viene ripetuta per dodici volte, variando ogni volta la terna di campioni audio proposti.

Il test è stato effettuato nell'Audio Space Lab (ASL) del Politecnico di Torino mediante un sistema di riproduzione ambisonico del terzo ordine.





*Figura 60 Postazione Audio Space Lab Politecnico*



*Figura 61 Postazione Audio Space Lab Politecnico*

L'audio ambisonico è un formato audio spazializzato che descrive con un elevato livello di dettaglio la direttività dei suoni registrati. In particolare, può essere considerato come una tecnica di registrazione dell'intero campo sonoro, attorno al punto centrale dove è posizionato il microfono (6).

Per descrivere come funziona la codifica del campo sonoro nell'audio ambisonico, è necessario introdurre il concetto di armoniche sferiche. Per comprendere facilmente questo concetto, lo si può confrontare con il suo equivalente bidimensionale.

Si presume che una forma d'onda generica  $s(t)$  sia campionata utilizzando la tecnica PCM (pulse-code modulation), quindi campionando a intervalli regolari nel tempo

e quantizzando l'ampiezza in valori dipendenti dalla profondità di bit stabilita per la digitalizzazione di questo segnale. Successivamente, il segnale campionato può essere analizzato con l'analisi di Fourier: questa analisi rende il segnale visibile nel dominio delle frequenze e lo rappresenta come la somma di varie sinusoidi di diverse frequenze, ciascuna con un'ampiezza e una fase specifiche.

Le armoniche sferiche sono l'equivalente tridimensionale di queste sinusoidi appena descritte. Un campo sonoro può essere considerato, in un singolo istante, modulato in PCM: saranno considerate solo alcune direzioni equidistanti (analogo alla discretizzazione del segnale monodimensionale nel tempo) e, a ciascuna di queste direzioni, viene attribuita una pressione sonora quantizzata, con una precisione dipendente dalla profondità di bit. Questo segnale può essere rappresentato anche come la somma di un insieme di armoniche sferiche, ciascuna con un peso specifico (analogamente all'ampiezza assegnata ai sinusoidi).

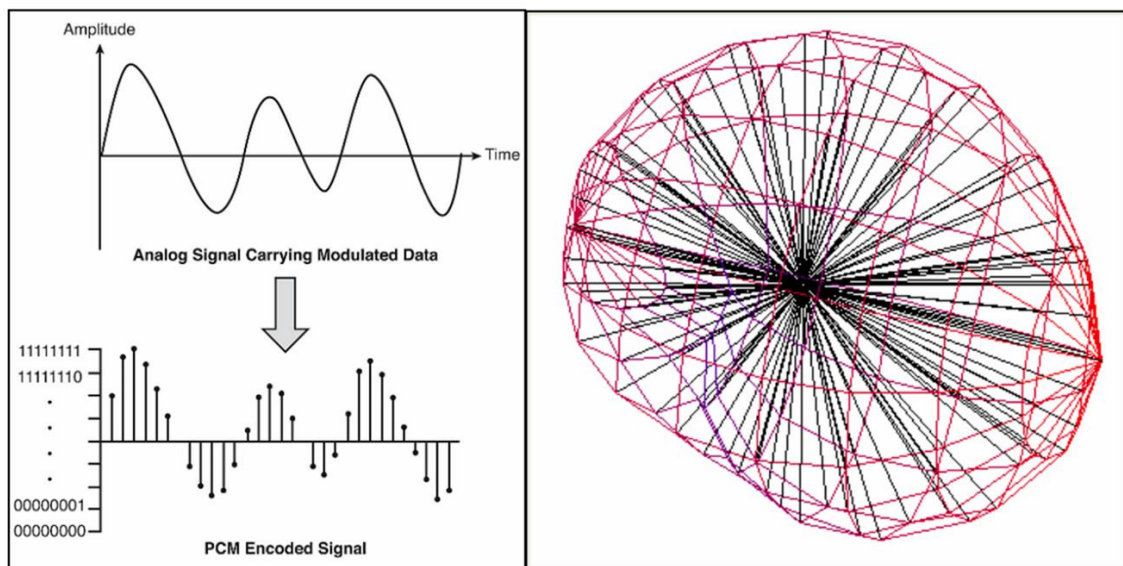


Figura 62 Analisi PCM temporale e spaziale (6)

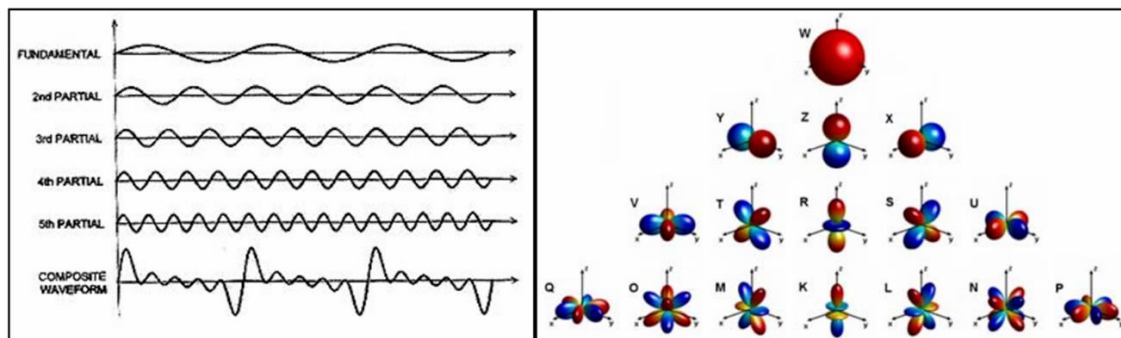


Figura 63 Analogia tra l'analisi di Fourier nel tempo e l'analisi delle armoniche sferiche nello spazio (6)

A seconda del livello di dettaglio desiderato del campo sonoro ricreato, ci sono diversi ordini di audio ambisonico, ognuno con un numero diverso di segnali, equivalenti al numero di armoniche sferiche utilizzate. In generale, la seguente relazione lega il numero d'ordine  $n$  al numero di canali utilizzati  $N$ :

$$N = (n+1)^2$$

L'audio ambisonico di ordine 0 contiene solo un canale onnidirezionale, mentre il primo ordine che discretizza le diverse direzioni di suoni diversi è il primo, che è anche l'ordine più utilizzato.

Una traccia ambisonica può essere rappresentata in diversi formati multitraccia, identificati da lettere dell'alfabeto. I due principali sono i formati A e B.

- formato A: questo è il segnale di uscita dei microfoni ambisonici, dove ogni traccia corrisponde a una capsula del microfono. Nel caso più semplice, quello del primo ordine, le quattro tracce sono le pressioni sonore registrate da quattro capsule del microfono disposte sui lati di un tetraedro (microfono Soundfield). Questo formato varia in base al microfono, perché le capsule, idealmente posizionate nella stessa posizione ma orientate in direzioni diverse, in realtà hanno una distanza variabile dal centro del sistema a seconda del modello del microfono;
- formato B: è la versione codificata del formato A e riconosciuta come quella universale; è indipendente dal microfono utilizzato e può essere decodificata in



modi diversi a seconda della disposizione degli altoparlanti nell'array di ascolto. I canali di questo formato sono dedicati ai pesi dei componenti del segnale sonoro nelle direzioni descritte dalle singole armoniche sferiche e quindi ogni armonica ha il suo canale dedicato.

La codifica dei file ambisonici consiste nel trasformare i file dal formato A di uscita del microfono al formato B, nel quale si ha la rappresentazione del campo sonoro. La decodifica, invece, consiste nel trasformare i file in formato B in una serie di tracce dedicate ai vari canali del sistema di riproduzione (6).

Si è scelto di effettuare il test nell'Audio Space Lab utilizzando campioni audio ambisonici per valutare con un livello di dettaglio maggiore le differenze che si percepiscono tra quanto ottenuto con le simulazioni e quanto misurato. Inoltre, il test di ascolto in ASL ha l'ulteriore scopo di valutare l'immersività e il realismo dei campioni audio auralizzati partendo da risposte all'impulso simulate.

Per poter effettuare i test sono state innanzitutto selezionate le risposte all'impulso oggetto di studio: tra le IR disponibili per l'aula 1T sono state scelte quelle dei ricevitori R2 e R4 con sorgente S1 attiva. Le risposte all'impulso ottenute con le misure sono in formato ambisonico del terzo ordine, così come quelle ottenute con Ramsete, mentre quelle ottenute con Treble sono in formato ambisonico del secondo ordine. Dal test si potrà evincere anche se ci sono differenze sostanziali a livello percettivo tra IR ambisoniche del terzo ordine e del secondo ordine.

Le IR provenienti dalle misure, da Treble e da Ramsete sono state innanzitutto portate alla stessa frequenza di campionamento di 48.000 Hz. Successivamente è stata effettuata una correzione dell'orientamento nello spazio dei file ambisonici, per uniformare i sistemi di riferimento delle risposte all'impulso ambisoniche e renderle comparabili all'ascolto. Per fare ciò è stato utilizzato il plugin Sparta Rotator, agendo su parametro Yaw, come mostrato in Figura 64.



Figura 64 Schermata Sparta Rotator

Una volta rese confrontabili le risposte all'impulso, esse sono state utilizzate per effettuare l'auralizzazione di alcuni file anecoici. Gli audio anecoici selezionati sono tre e contengono: una traccia di violino, una voce maschile e una voce femminile. Sono stati scelti questi tre file per disporre di tre tracce che avessero un contenuto in frequenza il più possibile diverso tra loro, come mostrato in Figura 65. La voce femminile ha un contenuto prevalente nelle medie frequenze, la voce maschile si estende fino ai 100 Hz, mentre il violino ha un contenuto prevalente alle medio-alte frequenze.

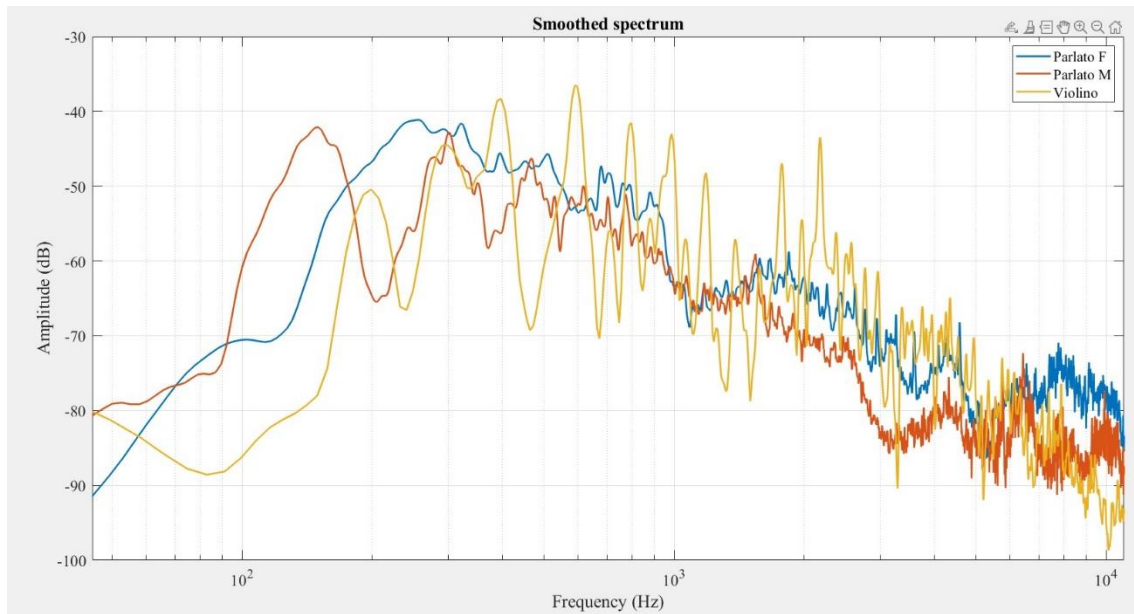


Figura 65 Confronto risposte in frequenza delle tracce anecoiche

Le tracce anecoiche selezionate sono state auralizzate con le diverse risposte all'impulso provenienti dalle misure, da Treble e da Ramsete mediante uno script Matlab che sfrutta l'ITA Toolbox (5). Lo script in questione è stato scritto appositamente per questo lavoro di tesi ed è stato generato con l'ausilio dello strumento di intelligenza artificiale Chat GPT. (7)

Essendo stati selezionati due ricettori (R2 e R4), ciascuno con tre risposte all'impulso, e tre tracce anecoiche l'insieme di file da cui attingere per il test percettivo contiene diciotto campioni auralizzati, come mostrato in Tabella 7.

	R2			R4		
	M	R	T	M	R	T
Violino	.	.	.	.	.	.
Voce F	.	.	.	.	.	.
Voce M	.	.	.	.	.	.

Tabella 7 Elenco campioni auralizzati per il test percettivo

Per la somministrazione dei quesiti del test percettivo e la raccolta delle risposte è stato creato un questionario mediante Google Form, che i partecipanti possono

compilare comodamente da smartphone mentre sono posizionati nella postazione di ascolto nell'Audio Space Lab.

Ad ogni iterazione del test viene proposta una nuova terna di campioni A, B e X e viene chiesto al candidato di compilare un nuovo modulo del test. Le domande sono le stesse per ogni terna di campioni e sono mostrate in Figura 66.

**Terna n.1**

Quale campione è identico a X? \*

A

B

Che tipo di differenza hai percepito tra A e B? \*

Colorazione

Spazialità

Nitidezza

Riverberazione

Intensità

Quanto è forte la differenza percepita da 1 a 10? \*

La tua risposta \_\_\_\_\_

Quale segnale sembra più realistico? \*

A

B

Figura 66 Domande questionario test percettivo



raccogliere informazioni utili riguardanti le differenze percettive tra dei campioni auralizzati partendo da IR misurate e dei campioni auralizzati partendo da IR simulate. L'analisi delle risposte consente inoltre di indagare quanto le simulazioni vengano considerate realistiche rispetto alle misure e se sistematicamente un software si è dimostrato più realistico dell'altro.

Il test è stato effettuato con un campione statistico di undici partecipanti, tutti quanti musicisti o professionisti nel settore dell'acustica. Dopo aver effettuato il test a tutti i candidati, i risultati sono stati raccolti in un file Excel per l'analisi. Come mostrato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, sono state raccolte innanzitutto le risposte al primo quesito: "Quale campione è identico a X?". In questo modo si ha traccia, per ogni partecipante, di quali campioni audio sono stati identificati correttamente e quali no. Sfruttando l'inversa della funzione di densità di una distribuzione binomiale (11 tentativi, 0.5 probabilità di risposta corretta, 0.95 livello di confidenza) è stato calcolato il numero minimo di risposte esatte per poter dire che la differenza tra i campioni sia percepibile, pari a 8. Se il numero di risposte esatte fosse inferiore a quello indicato vorrebbe dire che i campioni sono troppo simili tra loro e le differenze non sono percepibili.

Iniziali ascoltatore	Treble						Ramsete					
	R2			R4			R2			R4		
	Violino	Voce F	Voce M	Violino	Voce F	Voce M	Violino	Voce F	Voce M	Violino	Voce F	Voce M
AA	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1
DC	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
LG	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
LG	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
MC	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
MV	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
MF	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
DM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
CM	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1
PO	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1
KM	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1
11	11	10	10	11	11	11	8	9	9	10	10	11

Tabella 8 Risultati test – riconoscimento campione X

I risultati del test mostrano che per tutti i campioni proposti e per tutti i partecipanti il numero di risposte corrette è elevato; pertanto, ci sono differenze percepibili tra i campioni provenienti dalle misure e quelli provenienti dalle simulazioni. Si può

concludere quindi che i software di simulazione acustica, ad oggi, consentono di ottenere auralizzazioni molto realistiche, ma sono ancora distanti dall'essere indistinguibili dalla realtà.

Ai partecipanti al test è stato chiesto di quantificare da 1 a 10 la differenza percepita tra il campione A e il campione B (e quindi tra un file misurato e un file simulato). In questo modo è stato possibile valutare le differenze percepite tra le misure e Treble e tra le misure e Ramsete, al variare delle tracce anecoiche usate per l'auralizzazione e al variare del ricettore. I risultati sono riportati in Tabella 9.

	Quanto è forte la differenza percepita da 1 a 10?												Media	
	AA	DC	LG	LG	MC	MV	MF	DM	CM	PO	KM			
violino R2 Ramsete	1	4	4	5	5	7	5	5	4	5	3	4.4	4.4	4.6
parlato_F R2 Ramsete	5	6	6	6	5	6	3	4	5	8	2	5.1		
parlato_M R2 Ramsete	3	4	5	3	5	3	4	3	2	7	2	3.7		
violino R4 Ramsete	3	9	4	7	6	6	4	4	2	4	1	4.5	4.8	
parlato_F R4 Ramsete	4	6	4	6	4	5	3	4	7	3	3	4.5		
parlato_M R4 Ramsete	5	8	7	9	4	5	4	6	3	7	3	5.5		
violino R2 Treble	5	6	8	7	6	7	4	6	5	5	3	5.6	6.0	5.6
parlato_F R2 Treble	4	7	7	10	8	6	4	7	6	8	4	6.5		
parlato_M R2 Treble	7	7	8	9	9	7	3	1	5	7	2	5.9		
violino R4 Treble	5	7	5	7	5	4	5	5	7	3	2	5.0	5.6	
parlato_F R4 Treble	4	6	8	10	8	6	4	4	6	7	4	6.1		
parlato_M R4 Treble	6	4	6	9	6	7	4	4	7	6	3	5.6		

Tabella 9 Risultati test – differenza percepita

I risultati mostrano che le differenze percepite tra A e B mediamente si assestano attorno al valore 5. Quindi, seppur risulta evidente che i campioni provenienti dalle simulazioni sono distinguibili dai campioni provenienti dalle misure, le differenze percepite tra di loro sono comunque contenute. Inoltre, i risultati mostrano una diversa valutazione per i due software di simulazione: le differenze percepite mediamente tra Treble e le misure si assestano su un valore di 5.6, mentre le differenze percepite tra Ramsete e le misure su un valore di 4.6. Pertanto, basandoci sui risultati del test percettivo, Ramsete sembrerebbe descrivere meglio rispetto a Treble il comportamento reale dell'aula 1T.

In Tabella 10 sono riportate le differenze percepite dai partecipanti al test per ogni campione proposto. Considerando tutti i campioni proposti, le differenze che sono state maggiormente percepite sono la riverberazione e la nitidezza, mentre l'intensità risulta il parametro su cui sono state riscontrate meno differenze. In generale, le differenze percepite tra i campioni originati dalle IR misurate e quelli

originati dalle IR simulate riguardano in modo diffuso tutti quanti i parametri proposti e non sono riconducibili ad un solo.

	Differenze percepite				
	colorazione	spazialità	nitidezza	riverberazione	intensità
violino R2 Ramsete	1	4	3	7	4
parlato_F R2 Ramsete	1	3	7	8	6
parlato_M R2 Ramsete	6	3	6	8	0
violino R4 Ramsete	5	4	6	4	3
parlato_F R4 Ramsete	1	8	3	5	1
parlato_M R4 Ramsete	4	5	6	8	4
violino R2 Treble	6	6	4	1	7
parlato_F R2 Treble	2	10	2	6	1
parlato_M R2 Treble	5	5	9	5	4
violino R4 Treble	6	5	3	4	5
parlato_F R4 Treble	6	6	7	6	2
parlato_M R4 Treble	6	4	10	8	4
<b>totale</b>	<b>49</b>	<b>63</b>	<b>66</b>	<b>70</b>	<b>41</b>

Tabella 10 Risultati test – differenze percepite

Risulta interessante valutare anche come varia la differenza percepita tra i campioni al variare del file anecoico utilizzato per l'auralizzazione. Come mostrato in Tabella 11, mediamente la differenza percepita tra i campioni risulta più bassa se valutata con il file audio anecoico di violino. I file anecoici di voce, d'altro canto, sembrano facilitare il riconoscimento delle differenze.

Differenza percepita media	
violino	<b>4.9</b>
Voce F	<b>5.5</b>
Voce M	<b>5.2</b>

Tabella 11 Risultati test – differenza percepita media al variare del file anecoico utilizzato

Ai partecipanti al test è stato chiesto anche di esprimere una preferenza tra i due campioni audio ascoltati, indicando quale tra i due risultasse più realistico. I due campioni A e B ascoltati durante il test coincidevano in modo casuale con i file auralizzati da Ramsete, da Treble o dalle misure. L'analisi delle risposte a questo



quesito (mostrate in Tabella 12) permette quindi di individuare se c'è stata o meno una tendenza a preferire una particolare tipologia di campioni.

	AA	DC	LG	LG	MC	MV	MF	DM	CM	PO	KM	media
<b>M</b>	8	5	5	9	5	6	6	2	10	7	8	<b>6</b>
<b>T</b>	1	4	2	2	2	3	2	4	1	2	1	<b>2</b>
<b>R</b>	3	3	5	1	5	3	4	6	1	3	3	<b>3</b>

*Tabella 12 Risultati test – preferenze*

Mediamente i soggetti testati hanno considerato più realistici i campioni provenienti dalle misure. In particolare, su dodici confronti A-B proposti, mediamente, le persone hanno indicato come più realistici 6 volte i campioni originati dalle misure, 3 volte i campioni originati da Ramsete e 2 volte i campioni originati da Treble. Il fatto che i campioni originati dalle misure abbiano raccolto sempre il numero maggiore di preferenze conferma che le simulazioni, per quanto realistiche, sono ancora distanti dall'essere indistinguibili dalla realtà misurata. Tra Ramsete e Treble mediamente Ramsete è stato considerato il software più realistico, seppur di poco. Dai risultati la preferenza non è così evidente e il campione statistico su cui sono stati effettuati i test è ridotto, pertanto risulta difficile affermarlo con certezza, ma è possibile che il maggiore realismo di Ramsete rispetto a Treble sia dovuto al fatto che Ramsete permette di auralizzare nel formato ambisonico del terzo ordine mentre Treble permette solo di auralizzare fino al secondo ordine. Questa ipotesi andrebbe approfondita con maggiore dettaglio e confermata con ulteriori test e per ora risulta solo una possibile chiave di lettura dei risultati.

## 14. Conclusioni

Il lavoro di progettazione acustica svolto sul teatro è stato portato avanti utilizzando massivamente il software Treble. Il software è stato utilizzato in ogni fase della progettazione: dalle prime analisi sull'ambiente vuoto, all'individuazione degli interventi acustici ottimali e alla scelta dei materiali e del loro posizionamento. In questo modo, impiegando il software in un contesto pratico, è stato possibile valutarne a pieno le potenzialità.

I software di simulazione acustica ad oggi sono uno strumento imprescindibile in fase di progetto; essi affiancano il progettista ad ogni passo, gli consentono di effettuare le scelte più oculate e di minimizzare i tempi. In quest'ottica Treble si è dimostrato un software estremamente valido: l'interfaccia user-friendly e il sistema cloud-based consentono grande versatilità e rapidità nell'utilizzo, mentre la possibilità di analizzare le basse frequenze con il solutore wave-based e di effettuare rapidamente auralizzazioni estremamente immersive lo rendono unico rispetto agli altri software di simulazione acustica. La possibilità di effettuare uno studio dettagliato delle basse frequenze e di individuare il comportamento modale dell'ambiente si è rivelata estremamente utile ed è stata determinante per individuare una soluzione progettuale che consentisse di ottenere un ascolto uniforme in tutto il teatro. Analogamente, la possibilità di effettuare rapidamente le auralizzazioni dell'ambiente simulato è stata determinante nell'individuare le soluzioni migliori e nel validare le scelte effettuate. In questo modo, con Treble, l'auralizzazione non è più solo uno strumento descrittivo con cui mostrare i risultati del progetto acustico concluso, ma diventa parte integrante del lavoro di progettazione, come strumento per valutare percettivamente le scelte progettuali.

Il confronto effettuato con Ramsete sul teatro e quello con Ramsete e le misure sull'aula 1T hanno messo in evidenza che i diversi software di simulazione acustica non differiscono più di tanto nel calcolo dei parametri acustici, pur implementando modelli di calcolo differenti. Quindi, per quanto riguarda l'approccio attuale alla

progettazione, basato sui descrittori acustici, il presente lavoro di tesi dimostra che sostanzialmente non vi è differenza tra l'utilizzo di un software piuttosto che un altro. Gli aspetti su cui i diversi software di simulazione hanno dimostrato di differire sono il calcolo della risposta in frequenza dell'ambiente e il calcolo delle risposte all'impulso (da cui derivano poi le auralizzazioni). Nel momento in cui si sceglie di utilizzare un approccio più moderno alla progettazione, mettendo al centro la percezione soggettiva e l'utilizzo della auralizzazioni come strumento progettuale, la scelta del software di simulazione da utilizzare fa la differenza. Le differenze tra i diversi software emergono quando si analizza la risposta in frequenza delle risposte all'impulso o si utilizzano queste ultime per effettuare delle auralizzazioni. In particolare, le analisi effettuate mostrano che Ramsete tende a sottostimare il contenuto energetico alle basse frequenze (< 200 Hz) rispetto a Treble e alle misure.

Il test percettivo effettuato nell'Audio Space Lab del Politecnico di Torino ha confermato che esistono differenze percettive non trascurabili tra i campioni audio auralizzati ottenuti con diversi software di simulazione. Inoltre, il test ha mostrato che, con la tecnologia attuale, ci sono ancora delle differenze tra i campioni ottenuti partendo dalle simulazioni e i campioni ottenuti partendo dalle misure. Nonostante queste differenze tutti i partecipanti al test hanno riportato dei riscontri estremamente positivi per quanto riguarda il realismo e l'immersività dei campioni audio ascoltati. Alla luce del test svolto, appare evidente come questa tipologia di test percettivi con audio ambisonico risulti uno strumento estremamente valido per valutare l'efficacia dei diversi software di simulazione.

Guardando alla progettazione acustica con un approccio moderno, ragionando non solo in termini di parametri acustici oggettivi ma anche di percezione soggettiva del suono, l'utilizzo di questa tipologia di test percettivi apre scenari interessanti. Un possibile sviluppo futuro del lavoro svolto per questa tesi potrebbe essere un confronto tra un numero maggiore di software di simulazione acustica commerciali, effettuato mediante test percettivi che sfruttano l'ascolto in formato ambisonico. Lo

stesso audio ambisonico si è rivelato uno strumento estremamente utile per valutare con grande accuratezza la percezione sonora e sarebbe interessante approfondire le differenze tra i vari ordini del formato ambisonico.

Per quanto riguarda i due casi studio affrontati nella presente tesi, un possibile sviluppo per il lavoro svolto sull'aula 1T potrebbe essere approfondire la caratterizzazione della sorgente omnidirezionale utilizzata per le misure, in modo tale da correggere in modo più preciso le risposte all'impulso, oppure effettuare nuove misure con una sorgente lineare in frequenza, per poi riverificare il confronto con Treble e Ramsete. Per quanto riguarda il teatro, invece, risulterebbe estremamente interessante effettuare un confronto analogo a quanto fatto per l'aula 1T. Una volta terminata la costruzione si potrebbe prevedere una sessione di misure in loco, per raccogliere le risposte all'impulso dell'ambiente. Queste potrebbero essere poi utilizzate per effettuare dei confronti con quanto simulato con Treble e Ramsete, eventualmente ripetendo anche il test percettivo.

## Bibliografia

1. **Cammarata, Giuliano.** *ACUSTICA APPLICATA*. 2016.
2. *La misura della risposta all'impulso per la caratterizzazione di sistemi acustici e vibrazionali.* **Angelo Farina, Andrea Capra, Simone Campanini.** Parma : s.n., 2008.
3. **Treble technologies.** Knowledge base. *Treble tech.* [Online] <https://docs.treble.tech/intro>.
4. *Anechoic audio and 3D-video content database of small ensemble.* **David THERY, Brian FG KATZ.** Aachen : s.n., 2019.
5. **Acoustics, Institute of Technical.** *ITA-Toolbox* . [MATLAB Toolbox] Aquisgrana : RWTH Aachen University, 2010.
6. **Ignazio Ligani, Arianna Astolfi, Marco Carlo Masoero.** *Recording of ecological audiovisual scenes.* Torino : s.n., 2023.
7. **Open AI.** *Chat GPT.* [Online] 30 Novembre 2022. <https://chat.openai.com>.