

DIREZIONE OPERE PUBBLICHE

COMMITTENTE		COMUNE		
SCR Piemonte		Città di TORINO		
LIVELLO PROGETTUALE				
PROGETTO ESECUTIVO				
CUP		TITOLO INTERVENTO		
C14E21001220001		"TORINO, IL SUO PARCO, IL SUO FIUME: MEMORIA E FUTURO" REALIZZAZIONE DELLA BIBLIOTECA CIVICA E RIQUALIFICAZIONE DEL TEATRO NUOVO		
CODICE OPERA				
22044D02				
ELABORATO N.		TITOLO ELABORATO		
AC017		L'acustica nella sala del teatro		
DATA EMISSIONE		SCALA	AREA PROGETTUALE	
22/05/2025		-	Acustica	
FORMATO DI STAMPA		CODICE GENERALE ELABORATO	NOME FILE	
A4		22044D02_3_0_E_AC_00_CZ_017_0	22044D02_3_0_E_AC_00_CZ_017_0	
VERSIONE	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	CONTROLLATO
0	22/05/2025	Emissione Progetto Esecutivo a seguito dei pareri espressi dagli Enti preposti in CdS	ABDR	ABDR
IMPRESA AGGIUDICATARIA				
		COBAR S.p.A. Sede Legale: Via Selva 101; Sede Amm.: Via Monte Pollino 3 70022 Altamura (Ba) Italy		
RTP PROGETTAZIONE				
Capogruppo Mandataria:				
		ABDR Architetti Associati S.r.l.		
Mandanti:				
		MJW STRUCTURES		
		Manens S.p.A.		
Dott. Geol. Roberto Salucci		Integrazione Prestazioni Specialistiche: Arch. Michele Beccu - ABDR Architetti Associati S.r.l.		
Biobyte s.r.l. Ing. Maria Cairolì Dott. Enrico Moretti		Progettazione Categoria Edilizia - Beni Tutelati: Arch. Filippo Raimondo - ABDR Architetti Associati S.r.l.		
Ing. Roberto De Lieto Vollaro Ing. Alessandro Leonardi		Progettazione Categoria Strutture Ing. Massimo Majowiecki - MJW STRUCTURES		
Arch. Laura Calcagnini		Progettazione Impianti Elettrici e Speciali Ing. Massimo Cadorin - Manens S.p.A.		
		Progettazione Impianti Meccanici Ing. Viliam Stefanutti - Manens S.p.A.		
		Geologo		
		Consulenti Acustica Sala Consulenti Comfort acustico ambientale		
		Consulenti Progettazione Antincendio		
		Consulente Ambiente/DNSH		
		Giovane Professionista: Arch. Valentina Bianchi - ABDR		
		BIM Manager Arch. Antonella Antonilli - ABDR		
		Coordinatore Tecnico del Progetto: Arch. Nicola Bissanti - ABDR		
		Timbri e Firme		
		Documento firmato digitalmente		
COMMITTENTE				
		SCR PIEMONTE S.p.A.		
ORGANISMO DI CONTROLLO				
CONTECO S.p.A.		Responsabile del Procedimento: Arch. Bruno Smania		
		Responsabile di Commessa: Ing. Tiziana Costanzo		

Room Acoustics – Teatro Nuovo Torino

Indice

1. Dati iniziali: Progetto PFTE

- 1.1. L'acustica nella sala PFTE
- 1.2. Relazione Generale PFTE
- 1.3. Requisiti acustici passivi
- 1.4. Relazione architettonica
- 1.5. Verbale del 18/09/2024

2. Progetto acustico PE

- 2.1. Range ottimali da letteratura
- 2.2. Analisi acustica geometrica preliminare PFTE e PE
- 2.3. Analisi acustica predittiva PE iniziale
 - 2.3.1 Dati PFTE e taratura PE

3. Analisi acustica predittiva PE finale

- 3.1. Analisi acustica predittiva di dettaglio

4. Conclusioni

Dott. Enrico Moretti,
ing. Maria Cairolì

BIOBYTE S.r.l.
20131 milano via a.m. ampère, 40
telefono (02) 2363784 - 70690704
fax 26.66.507
Partita IVA 04428820155

Bergamo, 18.02.25



Room Acoustics – Teatro Nuovo Torino

1. Dati iniziali: Progetto PFTE

L'analisi e lo sviluppo del progetto acustico del PE muovono da una fase preliminare di "anamnesi", ovvero dalla raccolta dei dati e delle informazioni riportati nel PFTE.

I principali documenti di riferimento del PFTE per l'analisi acustica della sala principale, *Room Acoustic Analysis*, del PFTE sono i seguenti:

- 22044D02_3_0_P_AC_00_CZ_003_2_L'acustica nella sala
- 22044D02_3_0_P_GE_00_CC_001_3_Rel Generale
- 22044D02_3_0_P_AC_00_CZ_002_2_Requisiti acustici passivi
- 22044D02_3_0_P_AH_00_CB_001_4_Rel Architettónica

A cui si aggiungono le informazioni contenute nel verbale del 18/09/2024.

1.1. L'acustica nella sala PFTE

Nella relazione "22044D02_3_0_P_AC_00_CZ_003_2_L'acustica nella sala" lo stato di progetto è trattato da pag. 8 a pag. 12, nel paragrafo 4.

I dati riportati sono i seguenti:

- valori medi di sala dei parametri acustici C_{80} , D_{50} , LF, G dedotti da elaborazione al calcolatore con software Odeon
- Mappa del parametro G a 1000 Hz da elaborazione software Odeon
- valori puntuali di C_{80} , D_{50} , LF, G, per i quali il ricevitore di riferimento e la quantità considerata varia in funzione della sorgente presa in esame come da tabella sottostante.

sorgente	S0	S1	S2	S3
quantità ricevitori	1	4	2	3

Nella relazione non sono riportati i Tempi di Riverbero.

Sono inoltre inserite mappe di acustica geometrica riferite allo stato di fatto (non di progetto). Le mappe utilizzano la sezione dello stato di fatto e, in pianta, sono mappati i raggi relativi alle sole pareti laterali (rimaste invariate dallo stato di fatto al PFTE), mentre manca il tracciamento relativo alla curva del proscenio introdotta nel PFTE.

I dati si riferiscono all'unica configurazione prevista per la sala (nel PFTE non sono presenti elementi ad acustica variabile), in particolare fanno riferimento alla fossa abbassata, ovvero quando la sala è utilizzata per il balletto.



1.2. Relazione Generale PFTE

Nella relazione generale del PFTE è richiesto di realizzare una sala polifunzionale con idoneo campo sonoro per ciascuna delle principali attività previste.

In particolare, come esplicitato nel verbale del 18.09.24, le destinazioni d'uso principali della sala sono le seguenti:

- spettacoli teatrali (prosa)
- balletti
- musical
- concerti
- congressi

1.3. Requisiti acustici passivi

In questa relazione è richiesto di seguire la norma 3382-1.

Questa norma chiede di indagare, quale parametro principale nello studio della Room Acoustics il tempo di riverbero misurabile, ovvero un tempo di riverbero derivante da una risposta ad impulso, T_{30} oppure T_{20} e non un tempo di riverbero calcolabile da modelli teorici che implicano un campo diffuso e un'uniformità dei coefficienti di fonoassorbimento (T_{Eyring} , T_{Sabine}).

Nel documento è anche richiesto al PE di definire i range dei parametri acustici relativi alle varie attività della sala traendo informazioni dalla letteratura.

1.4. Relazione architettonica

Dalla relazione architettonica si può dedurre, per sommi capi, la storia del campo sonoro della sala.

Nel primo concorso si è voluto caratterizzare la sala con un'acustica simile a quella dei teatri lirici dell'epoca (si veda in pianta la forma del boccascena), successivamente è prevalso lo sviluppo della nuova architettura razionalista, a discapito della qualità sonora. Negli anni 50 si è voluto trasformare la sala in uno spazio idoneo alla comprensione del parlato e ad accogliere apparati elettroacustici, cambiando la curvatura alle principali superfici diffondenti (boccascena) rendendole concave, ed aumentando il fonoassorbimento delle restanti pareti laterali.

Il PFTE si dirige nella direzione di ridare sonorità alla sala, riportando un boccascena convesso, senza esplicitare la destinazione d'uso a cui si vuol far riferimento.

1.5. Verbale del 18/09/2024

Il verbale fornisce i coefficienti di fonoassorbimento utilizzati nel software di simulazione del PFTE, non specifica il coefficiente di riflessione diffusa.

Fornisce i tempi di riverbero secondo la formula di Eyring.

2. Progetto acustico PE

Le attività del progetto acustico nel PE sono di seguito indicate:

- definizione dei range ottimali dei singoli parametri acustici da letteratura per ciascuna destinazione d'uso prevista dal PFTE
- analisi acustica geometrica PFTE
- approfondimento mediante analisi acustica predittiva (software Catt-Acosutics) delle fasi iniziali del PE a partire dalla verifica del Teyring di progetto PFTE e successiva definizione degli input secondo descrizione dei materiali da progetto e relative integrazioni.
- Stima del T_{30} e degli altri parametri acustici, verifica dell'uniformità del campo sonoro

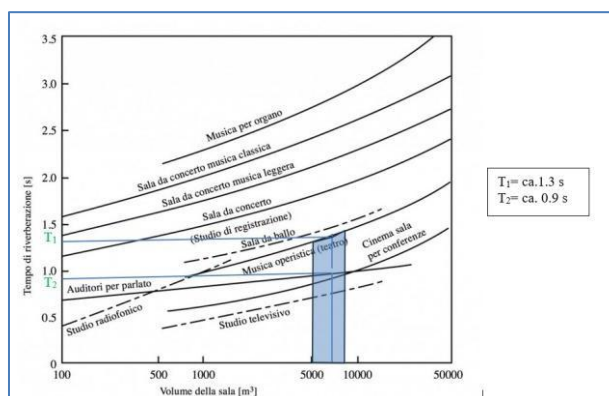
2.1. Range ottimali da letteratura

Numerose sono le fonti consultate per definire i range di riferimento richiesti dal PFTE. Di seguito si elencano le principali:

- Architectural Acoustics Long M. (2014) 2nd Ed. Academic Press
- Beranek L. Concert hall and opera houses. Berlin: Springer Verlag
- Barron M. Auditorium acoustics and architectural design. London. Chap: edited by Spon Press; 2009.
- Arau H. Renovating Teatro alla Scala Milano for the 21st century, Part II. J Acoust Soc Am 2005;117:2522.
- ISO 3382-1: (2009) Acoustics. Measurement of room acoustic parameters. Part 1: Performance spaces.
- Barron M. Theory and measurement of early, late and total sound levels in rooms. J Acoust Soc Am 2015;137(6):3087–98.

In letteratura, le caratteristiche acustiche per la sala con la fossa dell'orchestra ad uso balletto equivalgono a quelle della sala ad uso operistico, cambiano invece le esigenze relative alle linee di visibilità che diventano più ristrette nel caso della danza, in quanto la scena si svolge in modo molto più dinamico in tutta l'area di palco, e c'è l'esigenza di apprezzare il movimento di tutte le parti del corpo anche quelle degli arti inferiori.

Quale semplice grafico iniziale per orientarsi, che evidenzia le differenze dei valori del tempo di riverbero in funzione del volume della sala e della destinazione d'uso si utilizza il seguente grafico:



Quale tabella di riferimento per il tempo di riverbero, si sceglie invece quella più citata in letteratura, ovvero quella di Barron:

Table 2.3 Recommended occupied reverberation times (seconds)

Organ music	>2.5
Romantic classical music	1.8–2.2
Early classical music	1.6–1.8
Opera	1.3–1.8
Chamber music	1.4–1.7
Drama theatre	0.7–1.0

Per gli altri parametri si seguono i range comunemente indicati dagli autori elencati (tab.1).

Configurazioni	Range ottimale			
	T_{30} [s]	C_{80} [dB]	D_{50} %	G [dB]
Congressi e musical	$0.8 < T_{30} < 1.1$	-	$0.50 < D_{50} < 0.95$	≥ 5
prosa	$0.7 < T_{30} < 1.1$	-	$0.50 < D_{50} < 0.95$	≥ 5
Balletto Classico	$1.3 < T_{30} < 1.8$	$-2 < C_{80} < +4$	-	≥ -4
Orchestra Sinfonica	$1.8 < T_{30} < 2.2$	$-3 < C_{80} < +3$	-	≥ -4

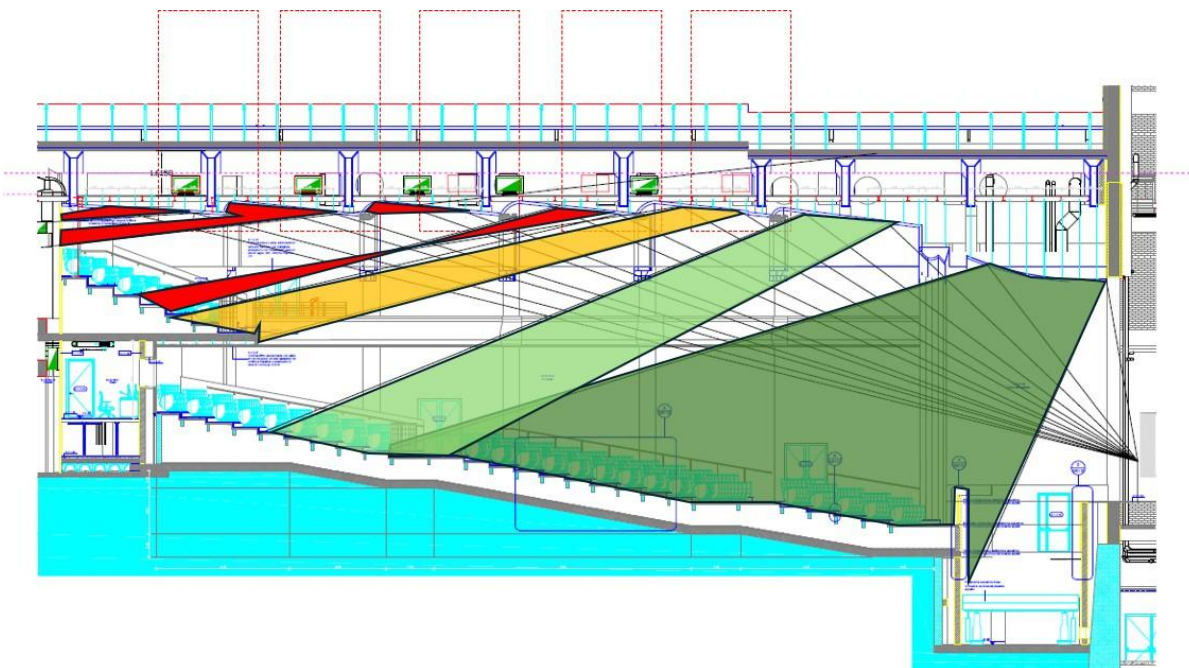
PFTE	Attività PRELIMINARE PE	SIMULAZIONI PE
		
Tempo di riverbero calcolato secondo EYRING	Definizione del range di riferimento T_{30}	Simulazioni del valore del T_{30} e dei principali indici acustici secondo la ISO 3382-1

2.2. Analisi acustica geometrica preliminare PFTE e PE

Il PFTE, pur migliorando il campo sonoro della sala nello stato di fatto, perviene a risultati acustici **non idonei** per nessuna destinazione d'uso specificata (prosa, congressi, musica, amplificata, balletto classico), i cui parametri si collocano, infatti, a cavallo tra i valori consigliati per attività differenti.

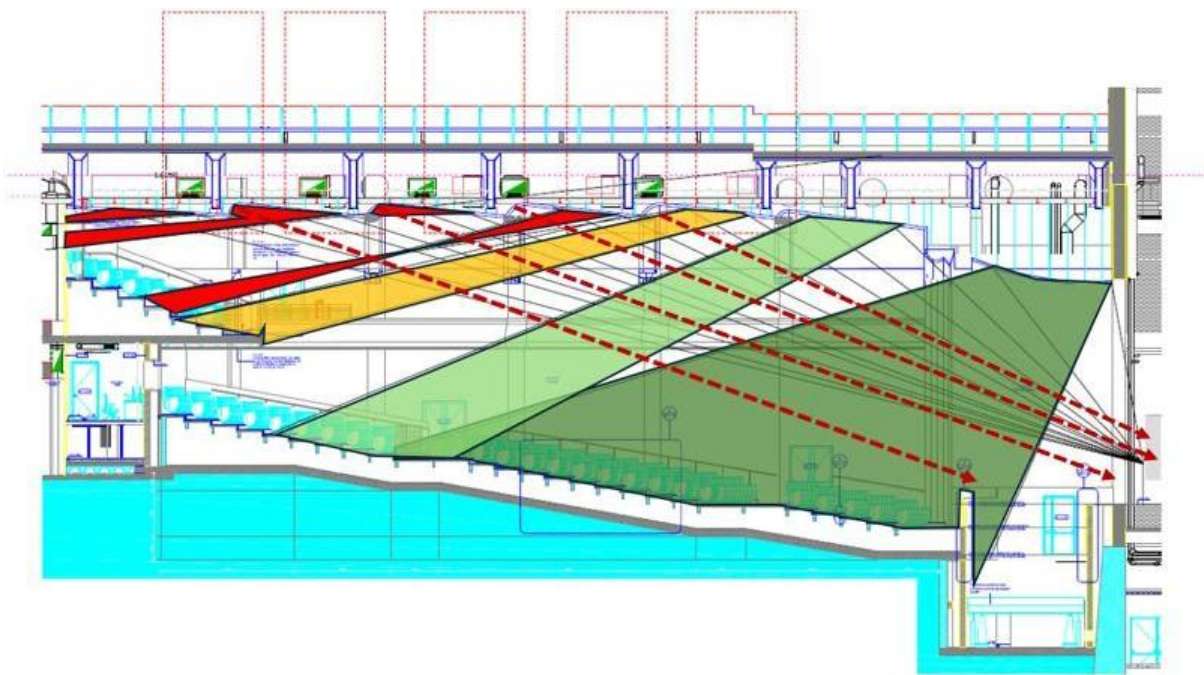
I parametri del PFTE che caratterizzano la sala, si collocano, infatti, a cavallo tra i valori consigliati per attività differenti.

La sala presenta anche un campo sonoro non omogeneo (cambiando posto l'ascolto cambia), poiché, nel PFTE, sono state introdotte migliorie solo nella zona di prosenio.

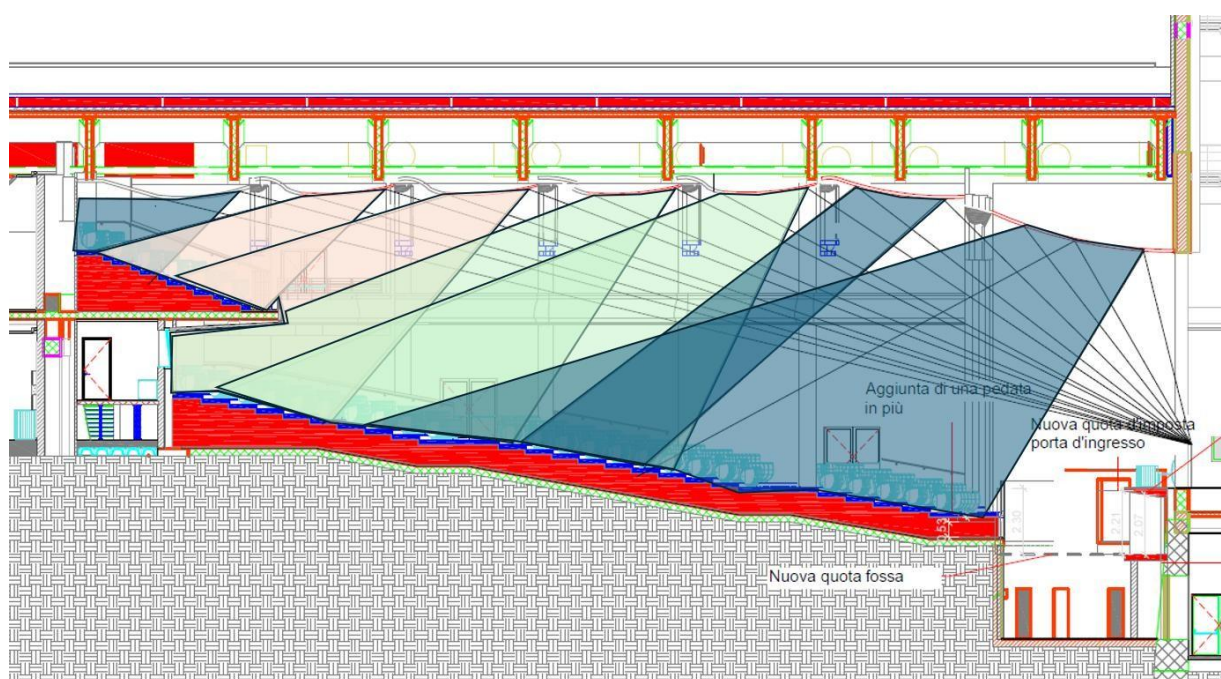


Di seguito si riporta l'andamento delle riflessioni speculari del soffitto del PFTE.

Nell'immagine sovrastante si vede come le riflessioni provengono principalmente dal boccascena e dalla prima campata (aree verdi), mentre sono carenti e/o assenti riflessioni che raggiungono gli spettatori dalle restanti parti di controsoffitto (aree arancioni e rosse), soprattutto nelle parte centrale e nelle ultime file di platea e nella galleria. Le concavità delle zone rosse, inoltre, generano fenomeni indesiderati, simili a quelli delle "cube ball waves", onde che ritornano indietro generando distorsioni (tra cui una variabilità significativa del campo sonoro). Si veda immagine che segue.



Nell'analisi acustica geometrica preliminare, il PE individua una miglioria poi esclusa dal progetto, che ottimizza la sala per la configurazione balletto, rendendo acusticamente attive le superfici di controsoffitto. La miglioria consiste nell'appendere pannellature convesse al controsoffitto, il cui tracciato si inclina verso la sala, ed elimina le focalizzazioni derivanti dai raccordi concavi del controsoffitto vicino alle modanature.



Nell'immagine soprastante si osserva che ogni campata produce riflessioni significative sia in platea sia in galleria.

Il PE apporta, invece, nel rispetto dei vincoli posti dalla Soprintendenza, le seguenti migliorie:

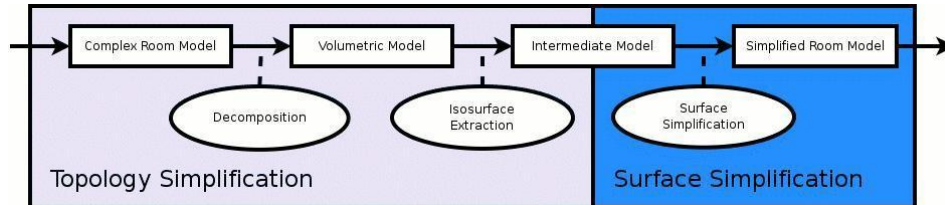
- introduce elementi ad acustica variabile, i tendaggi, per modulare il tempo di riverbero e gli altri parametri acustici in funzione delle attività da svolgersi, ottimizzando il campo sonoro per ogni configurazione prevista dal PFTE ad esclusione di quella per il balletto (per cui sarebbe necessario appendere i pannelli acustici al soffitto).
- Amplia la fossa dell'orchestra sotto il proscenio, aumentando la relativa superficie totale di ca. il 10%.
- Allinea la quota del parapetto cieco della balaustra della fossa dell'orchestra a quella del proscenio.
- Aumenta l'energia riflessa dal boccascena cambiandone il raggio di curvatura rispetto al PFTE, sia in pianta sia in sezione.
- Aumenta l'energia riflessa delle superfici delle prima "campata" confinante con il boccascena.
- Ottimizza i coefficienti di assorbimento delle superfici in sala, aumentando la ricchezza timbrica del campo sonoro.
- Migliora le linee di visibilità e quindi il suono diretto sfalsando le sedute in sala.

Le tende saranno abbassate solo nella parte alta delle pareti laterali vicino alla galleria, per ottimizzare l'acustica della sala per la configurazione prosa.

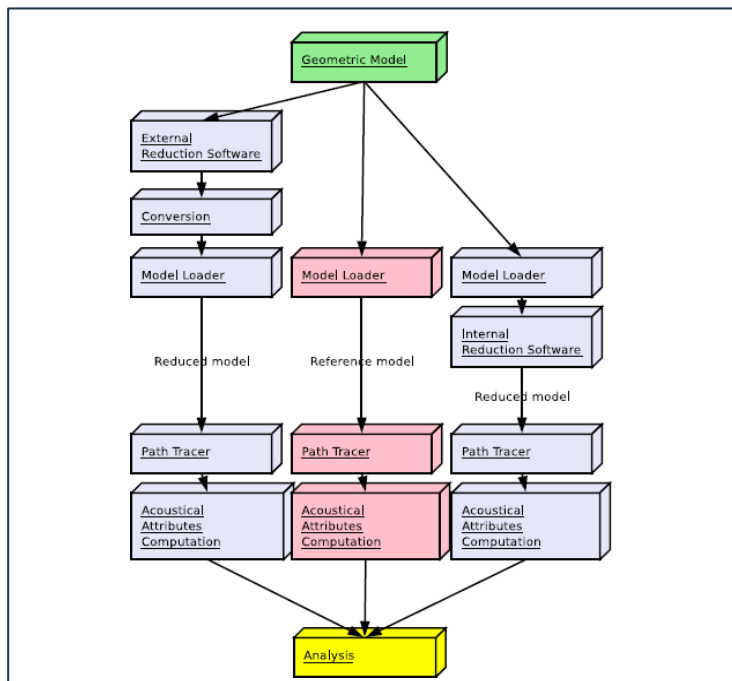
Le tende occuperanno una superficie più significativa qualora si volesse utilizzare la sala con forti potenze sonore derivanti da un sistema di amplificazione. In tal caso, le tende potranno essere abbassate, quale effetto scenico, in concomitanza della riduzione del livello di illuminamento delle luci a segnalare l'inizio dello spettacolo, non precludendo la visione della sala allo spettatore.

2.3. Analisi acustica predittiva PE iniziale

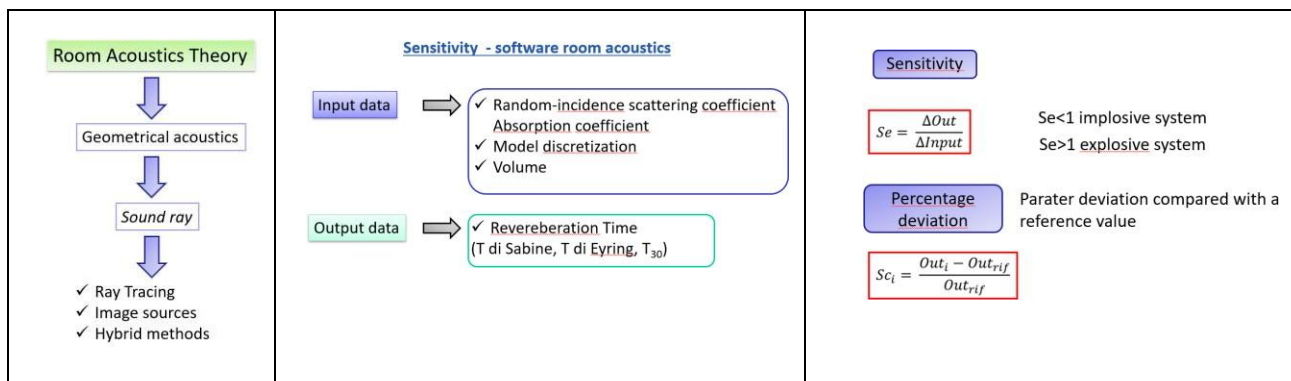
Nella fase iniziale dello sviluppo del PE si costruisce un modello virtuale 3D della sala, discretizzato secondo un livello idoneo al volume e alla geometria della sala stessa e al grado di sviluppo del progetto architettonico, avanzato nel PE.



In particolare, si costruisce un modello in sketch up da importare nel software dedicato Catt Acoustic, secondo lo schema procedurale di seguito indicato:



Si valuta inoltre la stabilità delle simulazioni.



La discretizzazione del modello geometrico ai fini di essere importato in un software di simulazione acustica è un argomento aperto, oggetto di numerosi articoli scientifici, e la scelta finale è demandata alla sensibilità del progettista e alla fase di dettaglio del progetto architettonico a cui si riferisce.

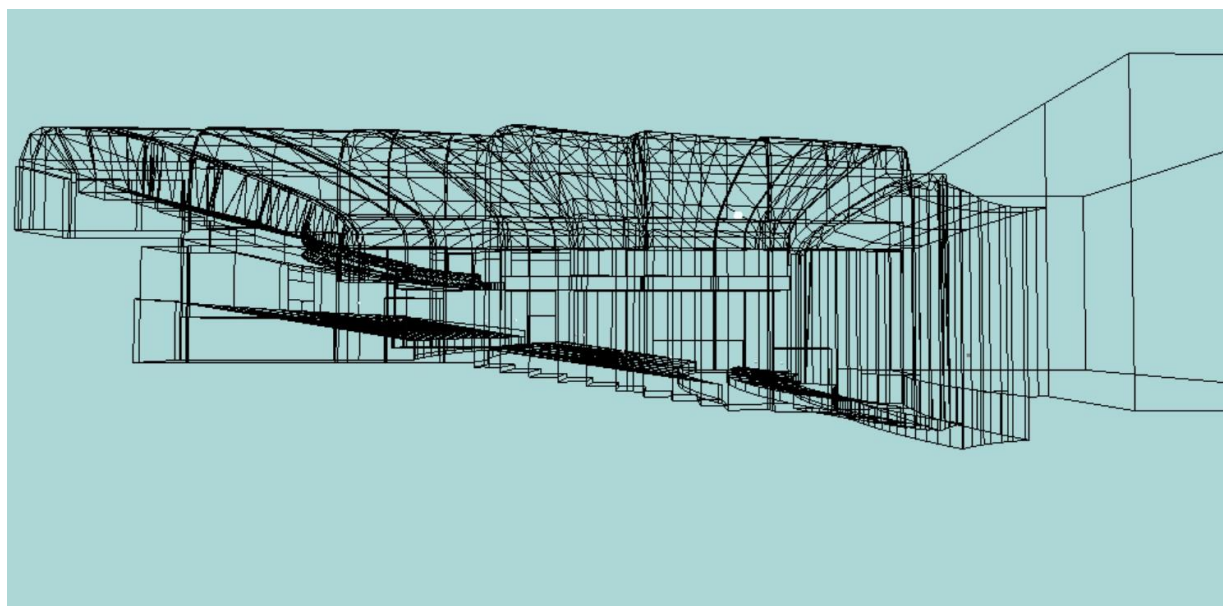
Letteratura in merito si trova nei testi sopra citati, a cui si aggiungono di seguito alcuni articoli, quali ulteriore approfondimento:

- Overview of geometrical room acoustic modeling techniques. The Journal of the Acoustical Society of America
- Concert hall acoustics: Recent findings, Leo L. Beranek. The Journal of the Acoustical Society of America
- V Chavez S Perigot. Acoustic Modelling Parameters Of Fly tower Theatres: Presentation Of A Case Study. Proceedings of the Institute of Acoustics

2.3.1 Dati PFTE e taratura PE

Nella fase preliminare del PE si utilizzano i dati di input del PFTE che confermano l'output T_{Eyring} del PFTE.

Di seguito si riporta il modello utilizzato di taratura in Catt Acoustic del PE con dati di input del PFTE.



Quale esempio si riporta la mappa della distribuzione del parametro G del PFTE.

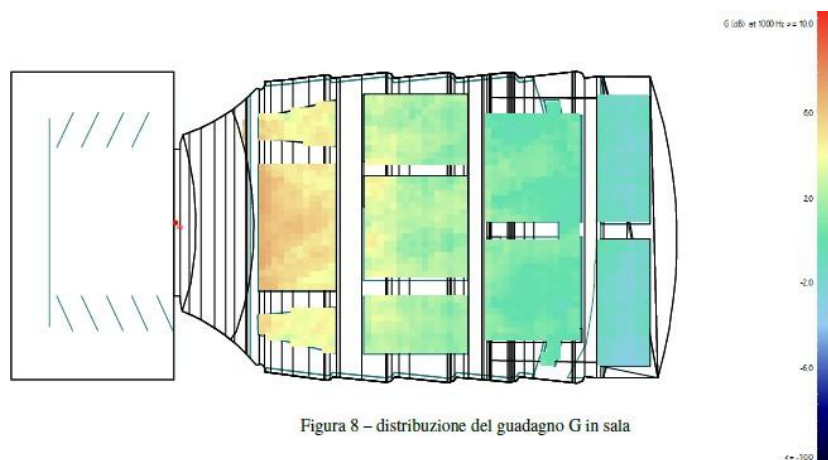
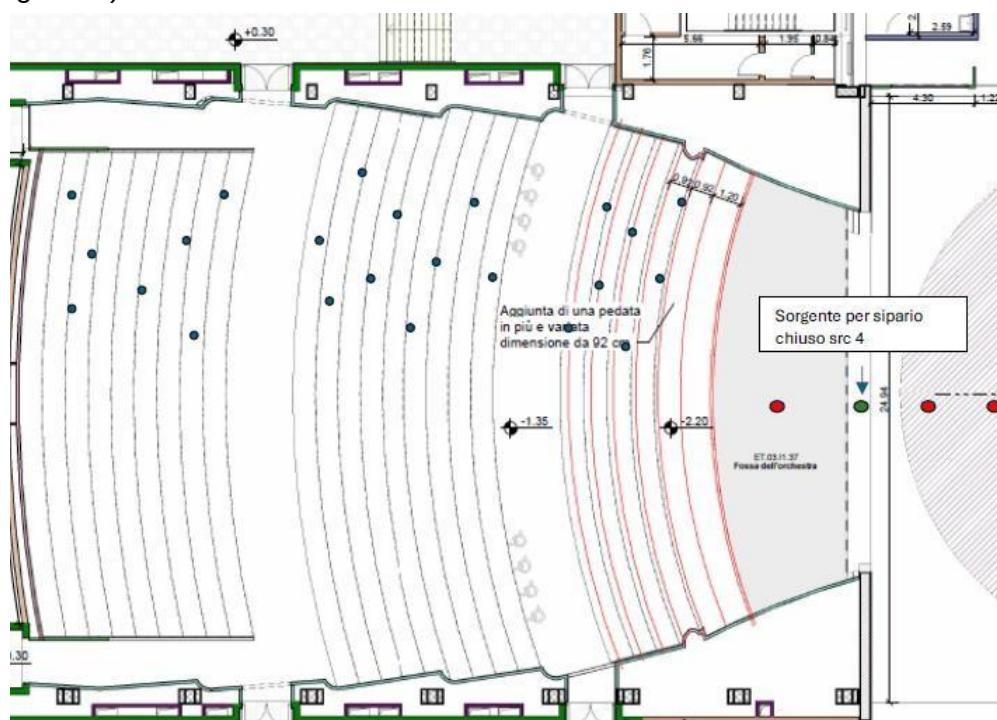


Figura 8 – distribuzione del guadagno G in sala

Mappa PFTE

I valori di G max nel PFTE, vicini al palco, sono circa pari a 5 dB, quelli minimi, in fondo alla galleria, pari a -2.5 dB ca (range pari a 7.5 dB).

Le sorgenti (ad esclusione della sorgente 4) e ricevitori utilizzati nelle simulazioni di taratura sono riportati nell'immagine che segue (i ricevitori sono posizionati anche nella parte di platea sottostante la galleria)



Sia nel PFTE (vedi mappa sopra riportata), sia nel PE, i valori di G non si adattano molto alla destinazione d'uso congressuale e a quella con spettacoli amplificati (musical e pop music) ma meglio si addicono ad attività musicali (acustiche) e al balletto classico (acustico).

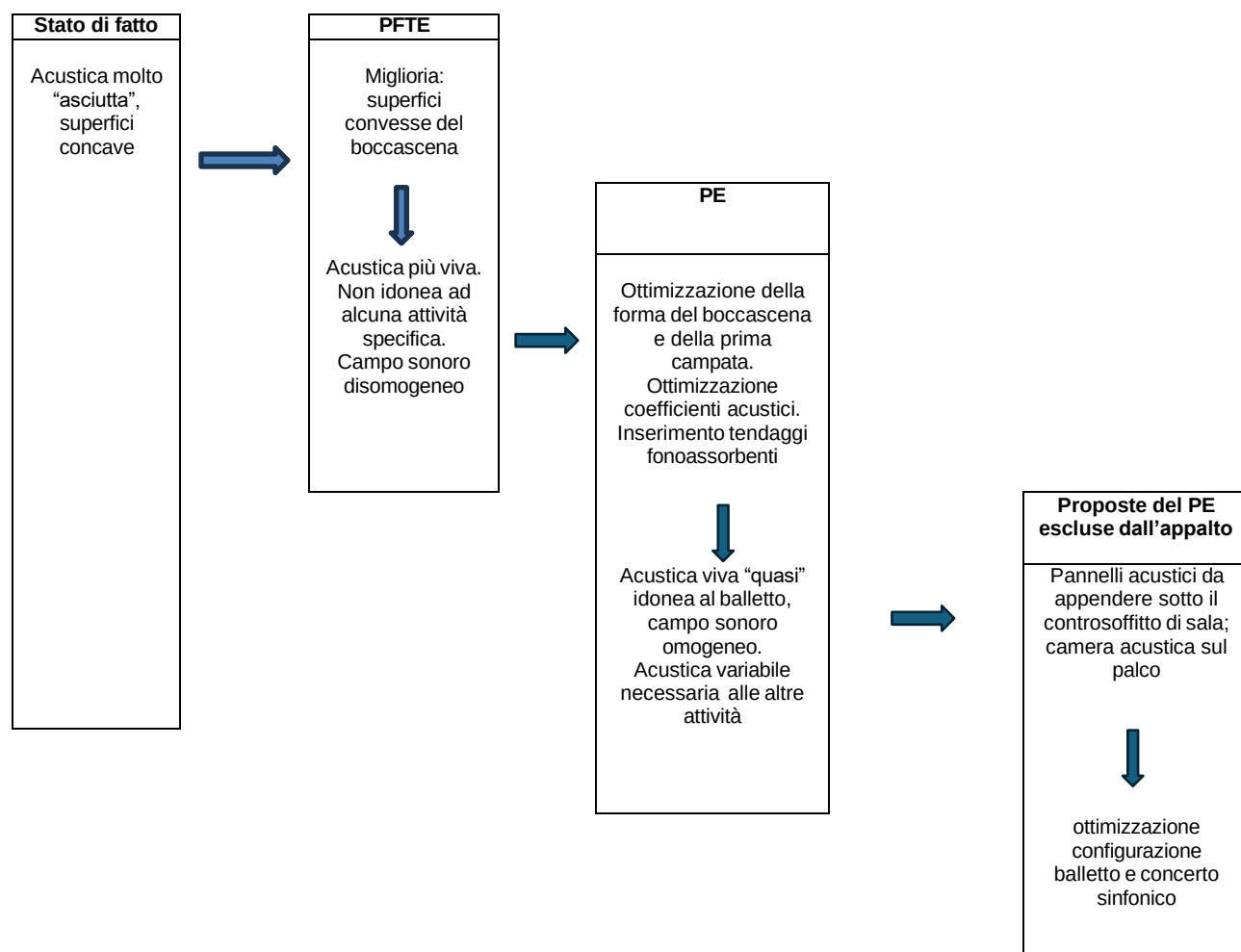
Il tempo si riverbero alle frequenze centrali, simulato con il modello di taratura, per il PFTE risulta pari a 1.23 s. Questo valore non risulta idoneo per nessuna attività definita nella stessa fase di progetto.

Le attività che richiedono la comprensione del parlato o le attività che comportano il ricorso a un'amplificazione con elevate potenze sonore necessitano di una risposta acustica più "asciutta", ottenibile mediante l'utilizzo di elementi ad acustica variabile quali tende fonoassorbenti telecomandate, elementi facilmente armonizzabili nel progetto del PFTE.

Nell'acustica progettata nel PFTE, pur migliorando il campo sonoro della sala nello stato di fatto, lo spazio risulta non idoneo per nessuna destinazione d'uso specificata (prosa, congressi, musica, amplificata, balletto classico).

I parametri del T_{30} del PFTE (inizio PE) che la caratterizzano si collocano, infatti, a cavallo tra i valori consigliati da letteratura per attività differenti.

Schema dello sviluppo del progetto acustico dallo stato di fatto al PE:



3. Analisi acustica predittiva PE finale

L'analisi acustica predittiva muove dalle seguenti attività preliminari:

- Approfondimento dell'analisi acustica geometrica di sala.
- Definizione della stratigrafia del pavimento di platea e relativi coefficienti di assorbimento acustico, indicativi delle caratteristiche di un pavimento ligneo vibrante, necessario ai fini dell'ottimizzazione della qualità acustica teatrale (si veda progetto architettonico).
- Definizione dei coefficienti di assorbimento delle poltrone che equivalgano alla presenza delle persone in sala (per rendere il campo sonoro della sala indipendente dal numero di persone presenti), come indicato nella tabella che segue:

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Coef. ass	0.5-0.7	0.6-0.8	0.7-0.9	0.7-0.9	0.7-0.9	0.7-0.9

Il retro dello schienale ed i fianchi delle poltrone devono presentare una superficie fonoriflettente.

- Definizione del coefficiente di assorbimento delle altre superfici ai fini di equilibrare l'energia assorbita alle varie frequenze. I coefficienti individuati a tale fine condizionano la scelta delle stratigrafie delle partizioni verticali e del soffitto, oltre che dei loro ancoraggi (si veda abaco progetto architettonico).
- Definizione dei coefficienti acustici per i tendaggi

Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Coef. ass	0.1	0.25	0.50	0.55	0.55	0.55

- Definizione del rivestimento della fossa dell'orchestra.
Le pareti della fossa saranno rivestite con pannelli di legno multistrato, massa areica pari a 10Kg/m², supportati da listelli anch'essi lignei. I pannelli avranno una distanza variabile dalla parete di calcestruzzo da 30 a 100 mm. In particolare:
 - parete di fondo 30 mm, pannelli curvi con raggio di curvatura 3 m
 - pareti laterali 70 mm
 - parete verso la sala 10 mm

Nell'intercapedine sarà posata fibra poliestere, peso specifico 50 kg/m³

Il pavimento della fossa deve poter vibrare facilmente. Sarà costituito da multistrato sp. 45 mm posato su listelli incrociati sp. 50 mm.

3.1 Analisi acustica predittiva di dettaglio

Si veda allegato 1.

4. Conclusioni

L'ottimizzazione delle forme e dei materiali che caratterizzano il boccascena e le superfici attigue, accompagnata da un'attenta disamina dei coefficienti di fonoassorbimento e da una migliore distribuzione delle sedute, il valor medio del Tempo di Riverbero T_{30} in sala previsto nel PE raggiunge il limite inferiore de range ritenuto ottimale per la configurazione balletto.

Il progetto individua, quali possibili ulteriori future migliorie, pannelli curvilinei da appendere a soffitto (massa areica pari a 13 kg/m^2) per ottimizzare la qualità sonora della configurazione sopra citata.

Per la configurazione concerto, il PE suggerisce invece di sviluppare un progetto di dettaglio per la camera acustica da allestire sul palcoscenico.

In merito alle altre configurazioni, il PE soddisfa gli obiettivi richiesti nel PFTE, introducendo tendaggi che creano un campo sonoro variabile all'interno della sala, rendendola idonea per congressi, concerti con musica amplificata e spettacoli di prosa.

Cordialità

Dott. Enrico Moretti,
ing. Maria Cairolì

BIOBYTE S.r.l.
20131 Milano via a.m. ampère, 40
telefono (02) 2363784 - 70690704
fax 26.66.517
Partita IVA 04428820155

Bergamo, 15.05.25

allegato 1

Room Acoustic Analysis

Dott. Enrico Moretti (CEO)
ing. Maria Cairoli (PM)

Bergamo, 20.02.2025



INDICE

Premessa

1 - Acustica Architettonica

1.1 - Analisi progettuale

1.2 - Criteri Acustici

2 - La Sala Teatro

2.1 - Analisi predittiva PE

2.1.1 - Configurazione 01 - Balletto

2.1.2 - Configurazione 02 – Prosa

3- Conclusioni

PREMESSA

Nella sala principale (Sala Teatro) è indispensabile sia garantire l'ottimizzazione della comunicazione, dell'ascolto e della comprensione del parlato, sia raggiungere il comfort sonoro auspicabile in tutti gli ambienti di pregio.

La fusione tra Acustica e Architettura, il legame tra le sensazioni soggettive e i parametri oggettivi che descrivono la percezione uditiva, diventano i temi centrali nella progettazione di spazi polifunzionali quale quello in oggetto.

Definito lo spirito dell'intervento e le destinazioni d'uso, è necessario stabilire quali siano le caratteristiche acustiche da indagare e le prestazioni da rispettare: la scelta più idonea, è quella di utilizzare indici acustici oggettivi sintetici, che permettano di descrivere con chiarezza sia le caratteristiche oggettive dell'ambiente, sia la percezione psicoacustica soggettiva conseguente alle scelte progettuali.

Prima di introdurre i parametri fisici che concorrono alla descrizione della qualità sonora è dunque utile delineare, nel dettaglio, gli obiettivi della progettazione acustica.

1. ACUSTICA ARCHITETTONICA

L'architettura dell'interno della Sala Teatro è pensata considerando le caratteristiche acustiche necessarie per diffondere il suono, evitare focalizzazioni e fenomeni di eco, e per assicurare una buona qualità di ascolto in ogni ordine di posti.

Per favorire la risposta acustica globale e predisporre l'ambiente ad accogliere un impianto di amplificazione, si considerano numerosi indici quali il Tempo di Riverberazione (RT) o l'indice di intelligibilità (STI), determinati tramite simulazione con un modello tridimensionale - a questo fine si è utilizzato il programma CATT-ACOUSTICS.

Il programma muove dalla risposta acustica delle diverse superfici interne della sala, considerando il loro grado di assorbimento e di diffusività, che varia in funzione della forma geometrica dei materiali di finitura e dal loro sistema di ancoraggio.

Lo scopo del modello è quello di simulare il comportamento sonoro dell'ambiente a partire dalla geometria del contenitore e dai tipi di finiture, armonizzando il comportamento delle diverse aree interessate dalla riflessione sonora, fino ad ottenere le risposte più idonee alle funzioni della sala.

L'acustica è quindi il risultato della forma, del grado di assorbimento dei rivestimenti delle pareti e dei pavimenti, della diffusività dei numerosi elementi architettonici (pavimento, controsoffitto, porte,

rivestimenti delle pareti, presenza di aperture, arredi, tipo di poltrone ecc..) e dalle caratteristiche acustiche del palco e della torre scenica nei suoi diversi allestimenti.

Si prevede che la sala abbia un'acustica variabile che assicuri una buona intelligibilità del parlato e una sonorità "viva" e "avvolgente", necessaria nelle esecuzioni musicali di natura acustica con predisposizioni capaci di modulare la risposta per soddisfare differenti esigenze: attività concertistiche di varia natura (spettacoli amplificati e non, con ensemble e formazioni variabili), congressuali e altre attività, inclusa la possibilità di utilizzare la sala per proiezioni cinematografiche.

1.1 - Analisi Progettuale

Le indagini sono effettuate mediante un modello virtuale tridimensionale elaborato con il codice di calcolo Catt-Acoustics, per lo studio dell'acustica naturale.

Per la finalizzazione dei calcoli e la visualizzazione dei risultati si indagano i parametri principali e successivamente si sviluppano gli approfondimenti.

La procedura adottata, supportata dagli strumenti descritti, consente una verifica puntuale dei risultati, anche in relazione a diverse possibili opzioni, e garantisce l'applicazione della migliore soluzione progettuale individuata.

Nelle varie fasi di sviluppo del progetto sono definiti i seguenti punti fondamentali:

- Le procedure di calcolo e simulazione
- I parametri acustici del sistema
- Le prestazioni acustiche che si realizzano in linea con la destinazione d'uso dell'ambiente, nel rispetto dei materiali e dell'architettura dell'ambiente.

Gli obiettivi di progetto sono i seguenti:

- Finalizzare una soluzione rispondente alle funzioni richieste
- Ottenere una copertura acustica efficace ed uniforme per lo scopo d'uso dell'ambiente
- Ottenere una risposta in frequenza in linea con la destinazione d'uso in esame

1.2 - Criteri Acustici

Le simulazioni acustiche servono per stabilire parametri fisico-acustici che definiscono le caratteristiche della sala.

I criteri utilizzati si basano sui risultati di ampie ricerche scientifiche e su valori empirici, acquisiti nell'ambito di molteplici teatri e sale per spettacoli e per manifestazioni.

E' ovvio che non è possibile descrivere completamente i processi della percezione uditiva soltanto con i parametri della fisica, ma una buona esperienza specialistica permette di formulare una valutazione fondamentale della qualità acustica dell'ambiente, sulla base delle grandezze fisiche esaminate in seguito.

Nella progettazione della Sala Teatro sono fondamentali i seguenti parametri acustici:

- tempo di riverberazione (RT)
- grado di potenza acustica G, grado di chiarezza C_{80} , la riflessione laterale LF, il tempo baricentrico T_s ecc...
- livelli di pressione sonora dei diversi ordini di posti
- livello massimo del rumore di disturbo ammissibile

Nella progettazione della Sala Polivalente si indagano i seguenti indici:

- tempo di riverberazione (RT)
- grado di potenza acustica G, grado di definizione D_{50} , ecc...
- livelli di pressione sonora dei diversi ordini di posti
- livello massimo del rumore di disturbo ammissibile

Tempo di riverberazione T

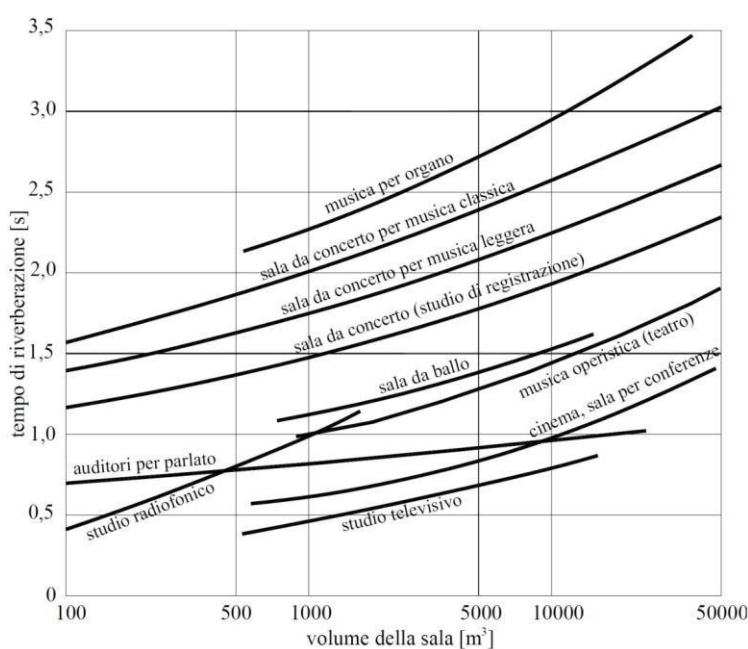
Il tempo di riverberazione T rappresenta uno dei parametri più importanti per poter giudicare le condizioni acustiche di un ambiente. Esso è un'unità di misura del potere "risonante" di un ambiente ed è definito come l'intervallo di tempo in cui il livello di pressione sonora cade di 60 dB dopo lo spegnimento della sorgente sonora (cioè, una caduta fino ad un milionesimo dell'energia sonora iniziale).

In sala il tempo di riverberazione T dovrebbe aumentare leggermente verso le basse frequenze, mentre verso le frequenze più alte T dovrebbe essere un poco inferiore. Questo comportamento è percepito come timbro caldo e piacevole negli ambienti.

Il tempo di riverberazione significativo per la sala, in bande di ottava, è situato nella gamma di frequenze da 125 Hz a 4000 Hz.

Il tempo di riverberazione si ottiene dalla curva di attenuazione della pressione sonora nel tempo. Poiché il decadimento non è rettilineo si distingue un tempo di riverberazione iniziale (in inglese Early Decay Time, EDT) ed il tempo di riverberazione reale T . Per l'EDT si analizza la caduta di livello tra 0 e -10 dB, per il tempo di riverberazione T invece la caduta di livello da -5 fino a -35 dB (T_{30}) e/o fino a -15 (T_{15}). I valori che ne derivano vengono estrapolati fino a considerare una caduta della pressione sonora pari a 60 dB.

La figura sottostante indica i tempi di riverberazione ottimali per diversi ambienti, dedicati a differenti usi, al variare delle volumetrie.



Tempi di riverberazione ottimali per destinazione d'uso e volume del locale

Criteri derivati dagli ecogrammi

Dagli ecogrammi si possono derivare i criteri che consentono di valutare i rapporti energetici, la manifestazione di echi fastidiosi o l'impressione spaziale mediante un valore numerico. Questi criteri hanno particolare importanza nelle bande di ottava 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz.

Parametri Energetici

Indice di potenza acustica G (o indice di robustezza)

Il grado di potenza acustica G descrive la percezione soggettiva dell'intensità sonora in un posto dello spettatore ed è l'unità di misura per l'energia sonora che si propaga dalla sorgente sonora al posto dell'ascoltatore (ricevitore). Un alto grado di potenza acustica significa una buona trasmissione dell'energia sonora dalla sorgente all'ascoltatore.

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt}$$

$p(t)$ è la risposta ad impulso della coppia sorgente/ricevitore nell'ambiente e $p_{10}(t)$ è la risposta che stessa sorgente farebbe misurare alla distanza di 10 m nello spazio libero. Per tutte le posizioni di emissione alle frequenze medie (frequenze medie di ottava 500 e 1000 Hz) il grado di potenza acustica G deve essere almeno $G \geq 0$ dB per ottenere un'adeguata impressione soggettiva dell'intensità sonora.

Indice di Definizione D50 "Deutlichkeit"

Il grado di definizione D_{50} rappresenta un criterio per valutare la "trasparenza" del linguaggio parlato. Per trasparenza si intende la possibilità di distinguere suoni che si susseguono nel tempo nonché la riconoscibilità dei fonemi.

Nel caso del grado di definizione si mettono in relazione i rapporti energetici tra energia sonora primaria "favorevole" per la chiarezza del suono e l'energia sonora secondaria, meno "favorevole" poiché giunge nel punto di ricezione con ritardo. Per il linguaggio, il valore limite che distingue l'energia primaria dall'energia secondaria s'aggira intorno a 50 ms. L'intelligibilità delle sillabe risulta tanto maggiore quanto maggiore è il valore di D; con indici di definizione del 45% si ottiene un'intelligibilità delle sillabe del 90%

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

Indice di Chiarezza C80 "Clarity"

Fra tutti i parametri descrittivi basati su una frazione energetica, il più importante è l'indice di chiarezza.

Questo parametro si riferisce alla possibilità di percepire nitidamente sia note suonate in successione rapida sia note suonate contemporaneamente da uno o più strumenti musicali.

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt}$$

Indice RASTI

L'indice RASTI (Rapid Speech Transmission Index) rappresenta la percentuale di fonemi compresi da un ascoltatore. Il parametro esprime l'intelligibilità del linguaggio parlato cioè la percezione di un segnale vocalico nella posizione del timpano. L'indice RASTI è definito come segue:

$$RASTI = \frac{1}{30} \left[\left(\frac{S}{N} \right)_{APP} + 15 \right] \quad \text{essendo}$$

$$\left(\frac{S}{N} \right)_{APP} = 10 \log_{10} \left(\frac{m}{m+1} \right) \quad \text{con}$$

$$m(\Omega) = \frac{\int_0^{\infty} g(t)^2 \exp(i\Omega t) dt}{\int_0^{\infty} g(t)^2 dt}$$

LF Lateral Fraction

A questi parametri si aggiungono, nel nostro studio, la determinazione dell'*efficienza laterale* LF e l'IACC (efficienza laterale e coefficiente di correlazione interaurale) assai importanti per caratterizzare la funzione nel rinforzo del suono delle pareti ubicate a destra e a sinistra di chi ascolta e la differenza di pressione sonora che raggiunge le due orecchie di un ascoltatore la corretta progettazione alla ricerca dell'ottimizzazione di questi parametri contribuisce ad assicurare una percezione del suono tridimensionale).

$$LF = \frac{\int_{0ms}^{80ms} h^2(t) \cos(\theta)^2 dt}{\int_{0ms}^{80ms} h^2(t) dt}$$

SPL (Sound Pressure Level)

SPL descrive la distribuzione della pressione sonora nell'ambiente in relazione alla pressione sonora della sorgente emittente.

2. LA SALA TEATRO

2.1 - Analisi predittiva

Di seguito si riportano i principali parametri descrittivi della risposta acustica predittiva della Sala Teatro, elaborata mediante codice di calcolo dedicato.

I valori di alcuni parametri sono rappresentati mediante mappe cromatiche, affiancate da relativa legenda, altri invece mediante tabella riportante il valor medio del coefficiente indagato (Tempo di Riverbero).

Si mostrano le immagini del modello e degli output di simulazione alle frequenze centrali (500 Hz, 1kHz) per le seguenti principali configurazioni:

Configurazione 01 - Balletto

Configurazione 02 - Congressi

Configurazioni	Range ottimale			
	T_{30} [s]	C_{80} [dB]	D_{50} %	G [dB]
Congressi e musical	$0.8 < T_{30} < 1.1$	-	$0.50 < D_{50} < 0.95$	≥ 5
prosa	$0.7 < T_{30} < 1.1$	-	$0.50 < D_{50} < 0.95$	≥ 5
Balletto Classico	$1.3 < T_{30} < 1.6$	$-2 < C_{80} < +4$	-	≥ -4
Orchestra Sinfonica	$1.7 < T_{30} < 1.9$	$-3 < C_{80} < +3$	-	≥ -4

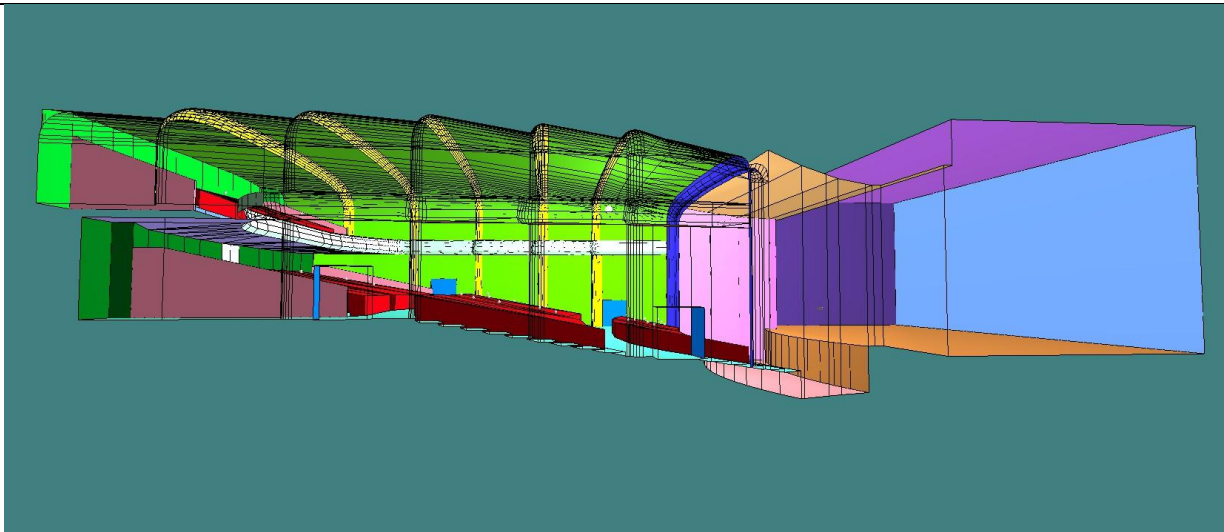
2.1.1 - Configurazione 01 – Balletto Classico

In sala, il pubblico è separato dalla scena dal boccascena.

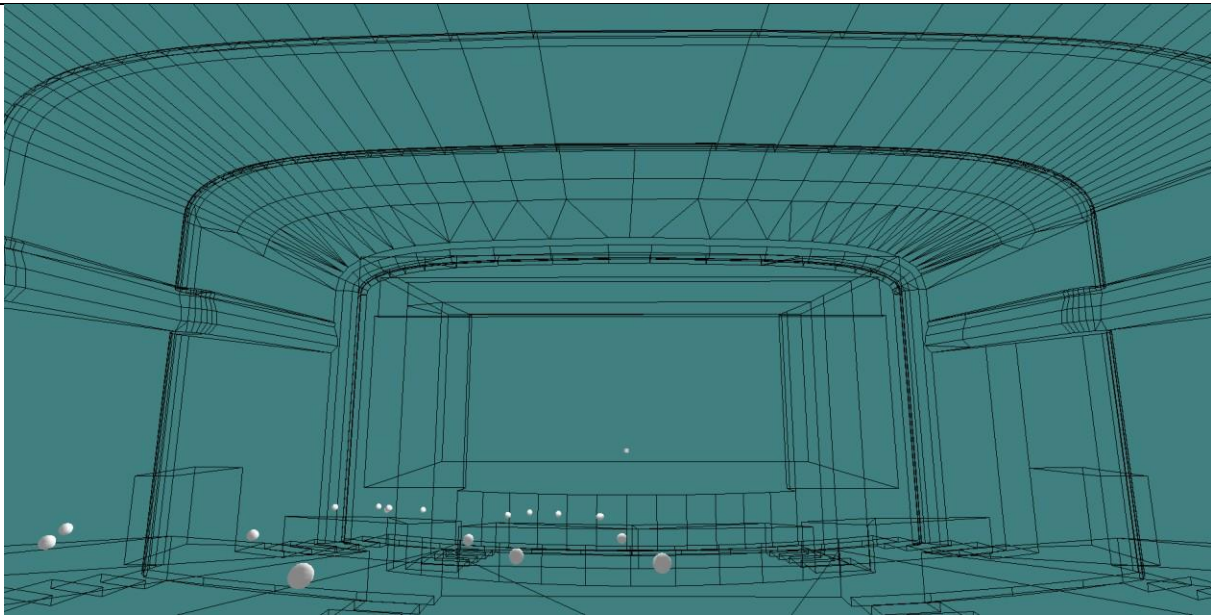
La pedana mobile, a ridosso del boccascena, si abbassa a creare la fossa per l'orchestra.

Si riportano le immagini del modello e dei principali output di simulazione alle frequenze centrali (500 Hz, 1kHz).

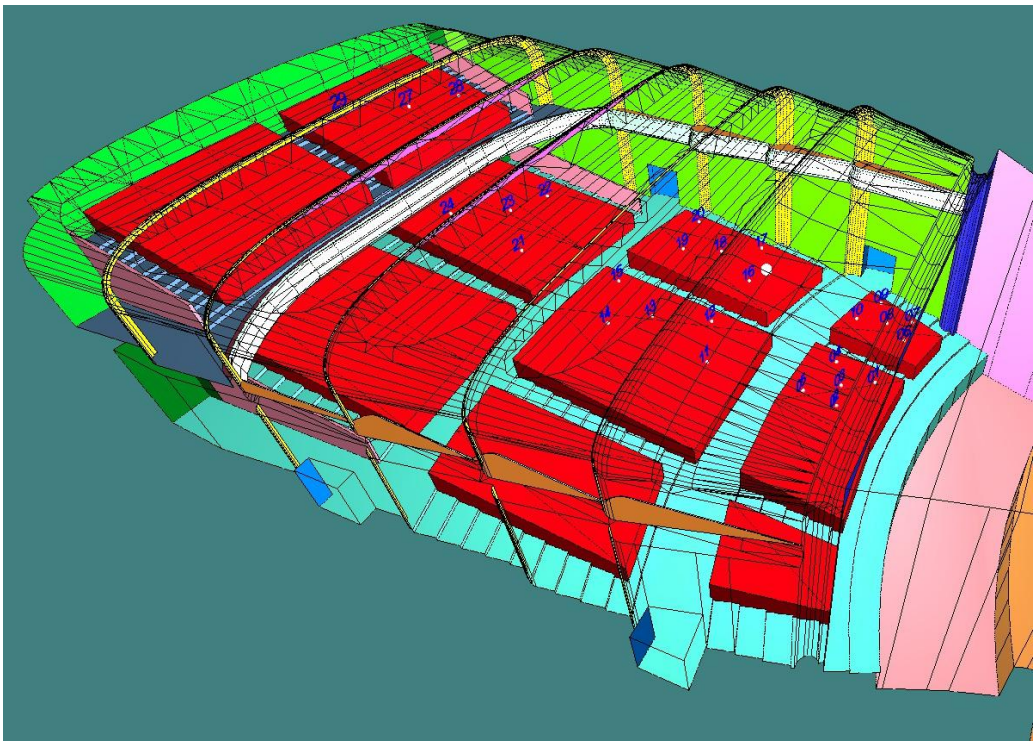
La sorgente è collocata sul palco.



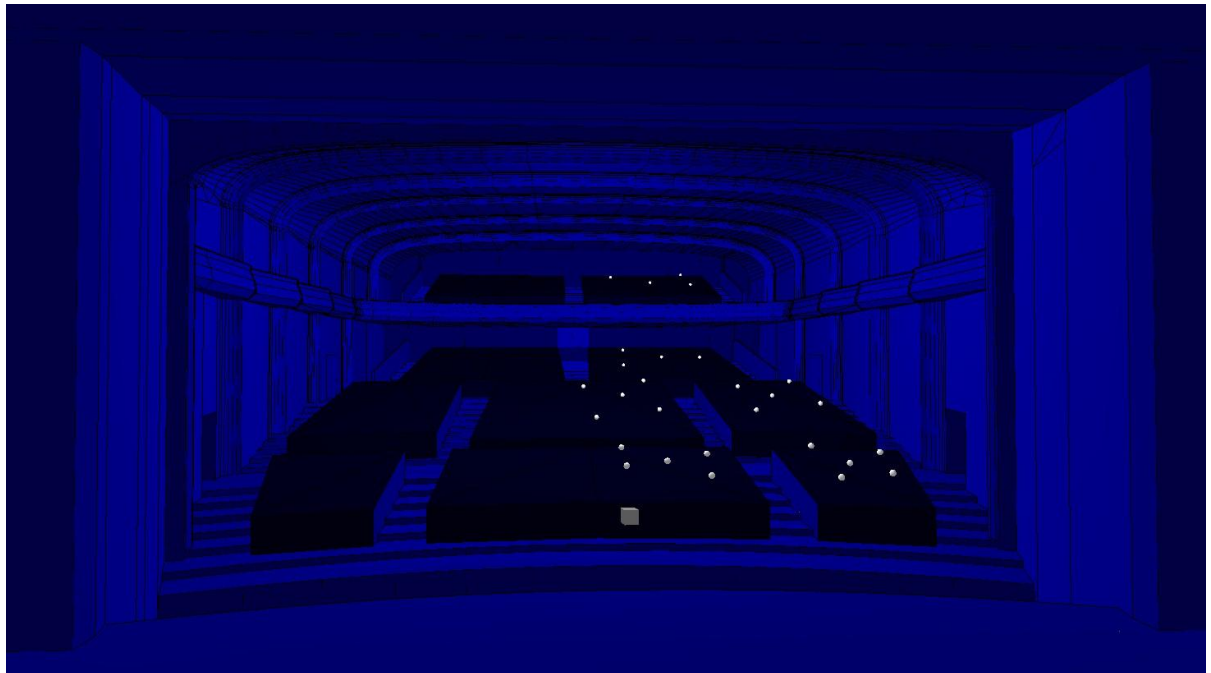
Vista prospettica – line di costruzione



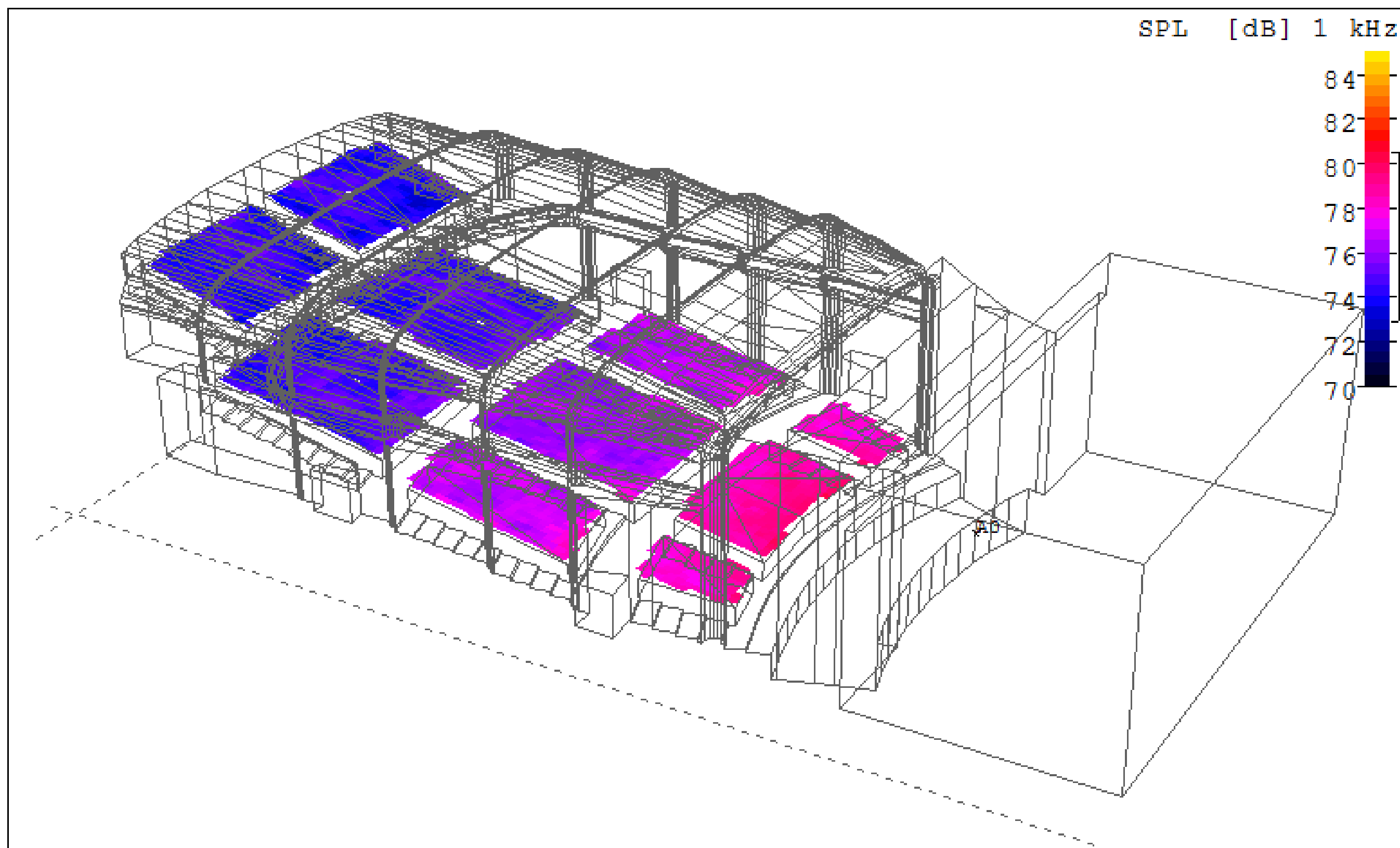
Vista prospettica – linee di costruzione, interno della sala verso il palco

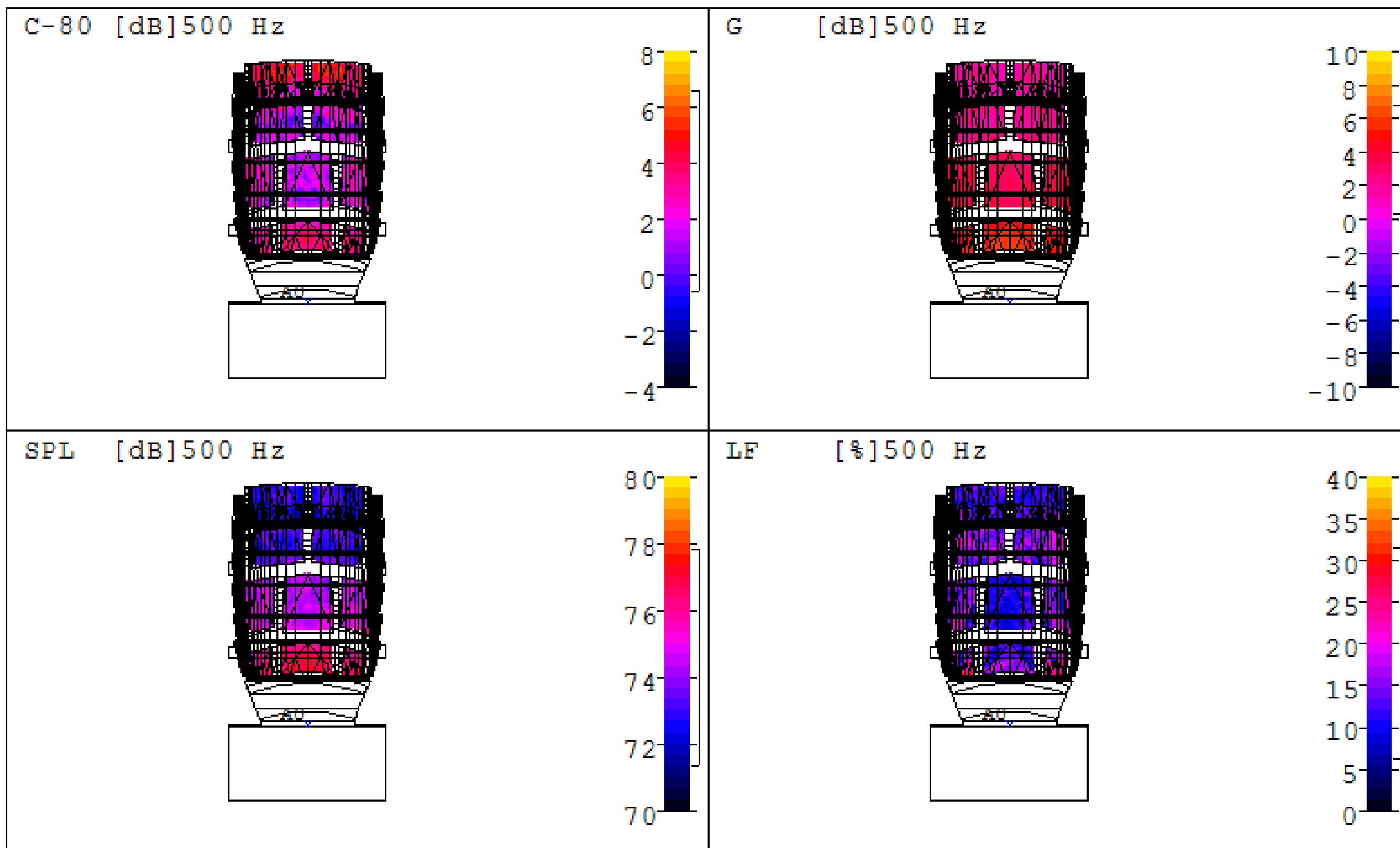


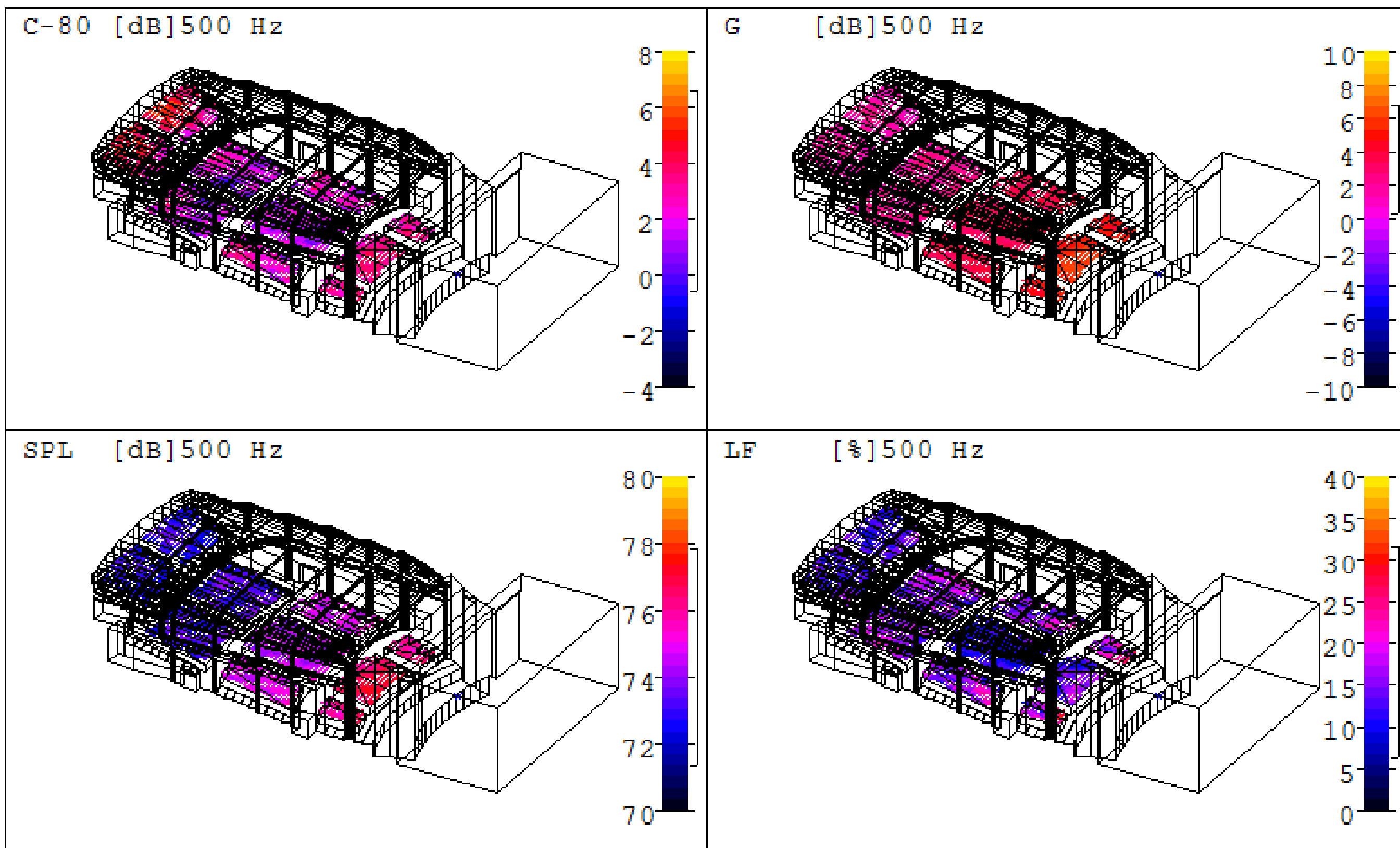
Posizione dei ricevitori

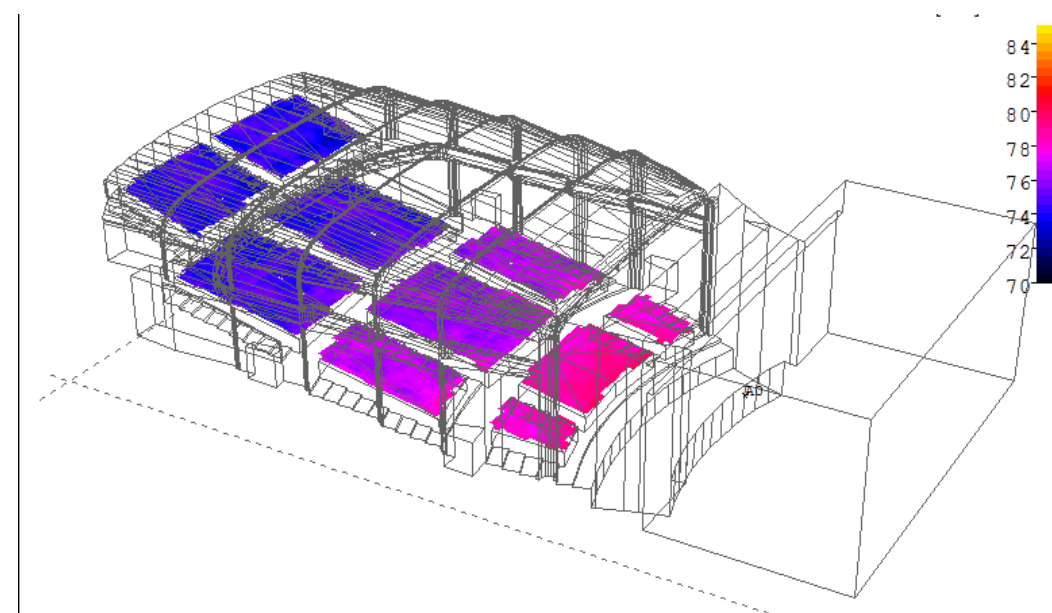
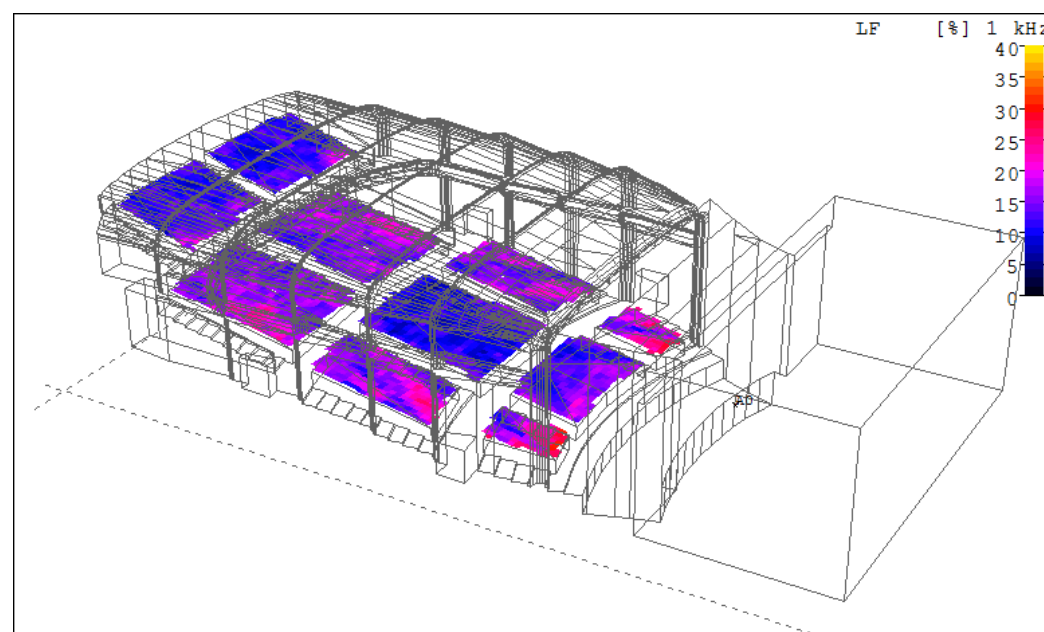
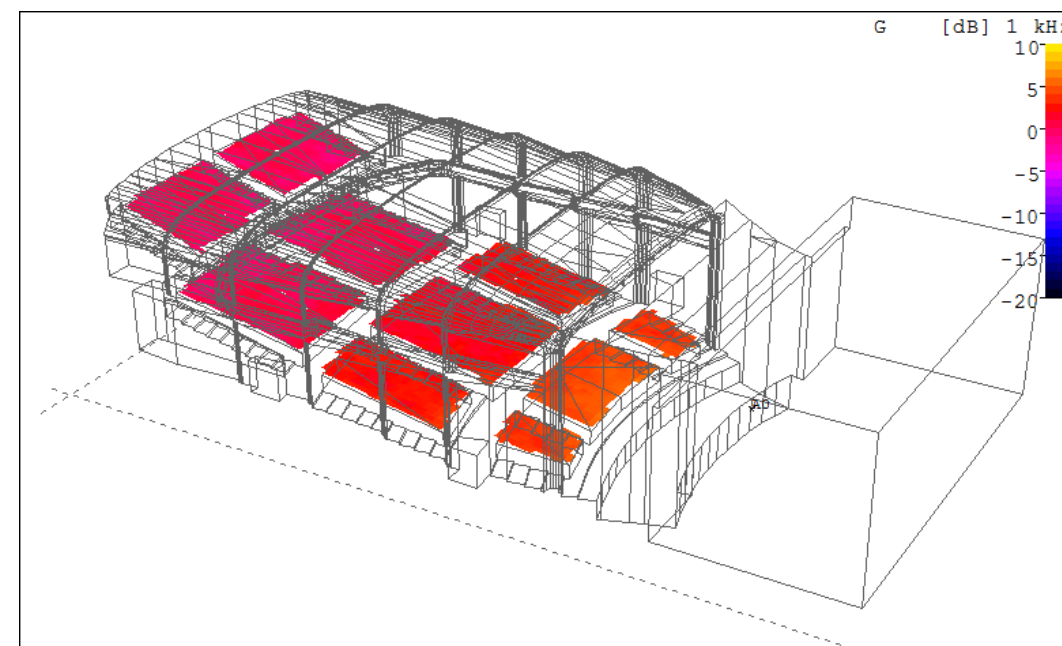
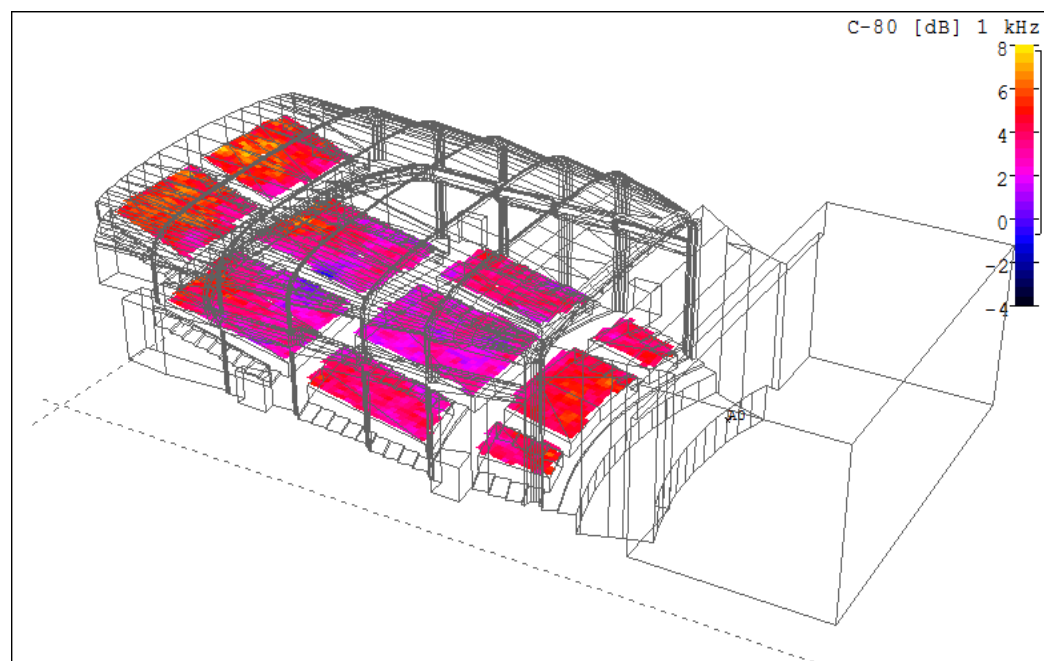


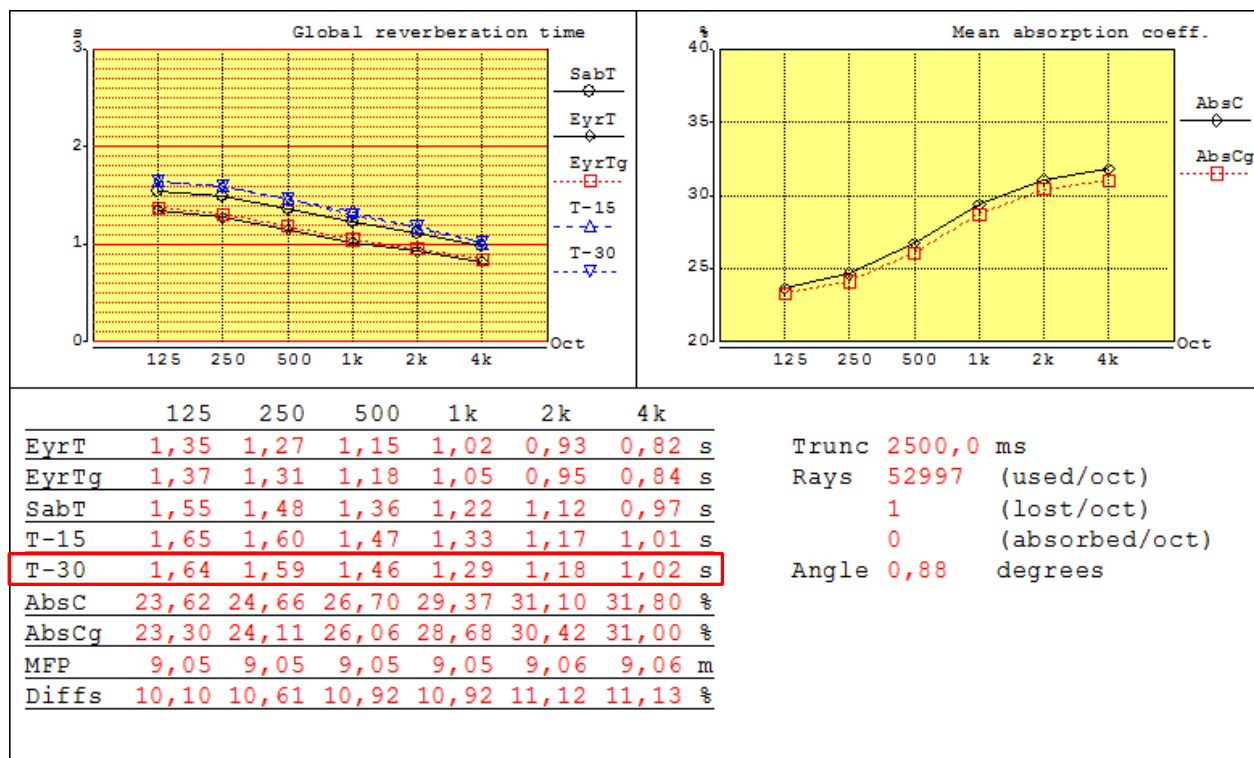
La sala vista dal palco











Reverberation Time (RT)

	Destinazione d'uso	Reverberation Time T_{30}
	Congressi	$0.8 < T_{30} < 1.1$
	prosa	$0.7 < T_{30} < 1.1$
	Balletto Classico	$1.3 < T_{30} < 1.6$

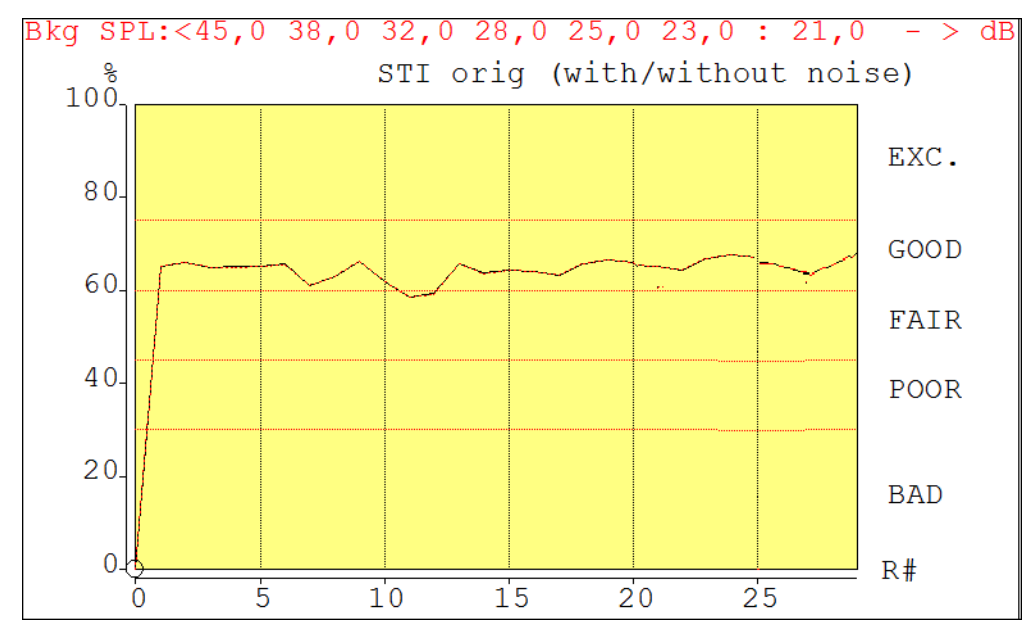
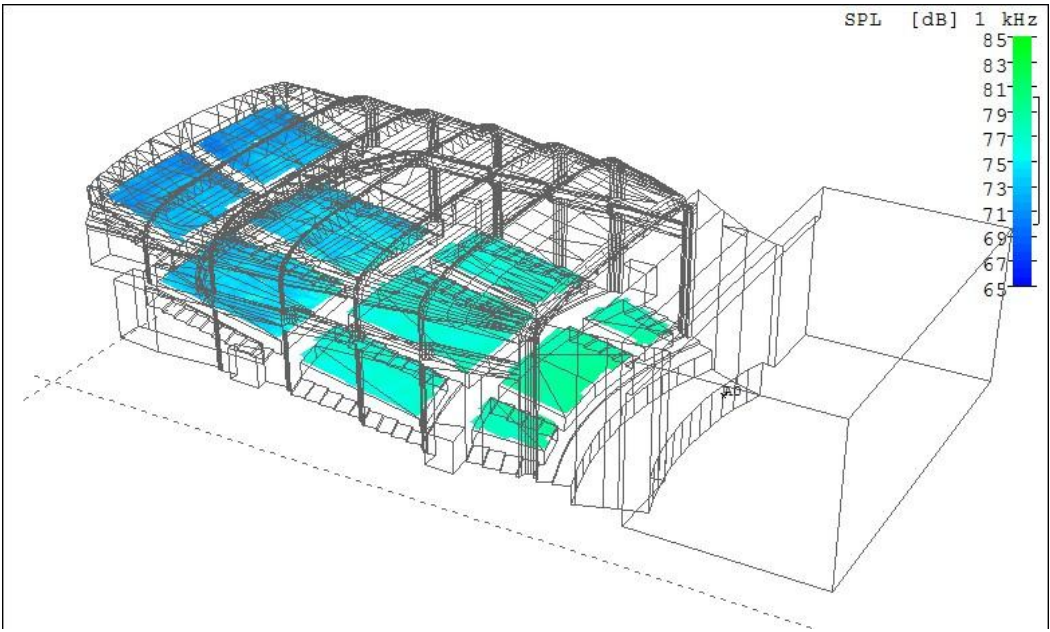
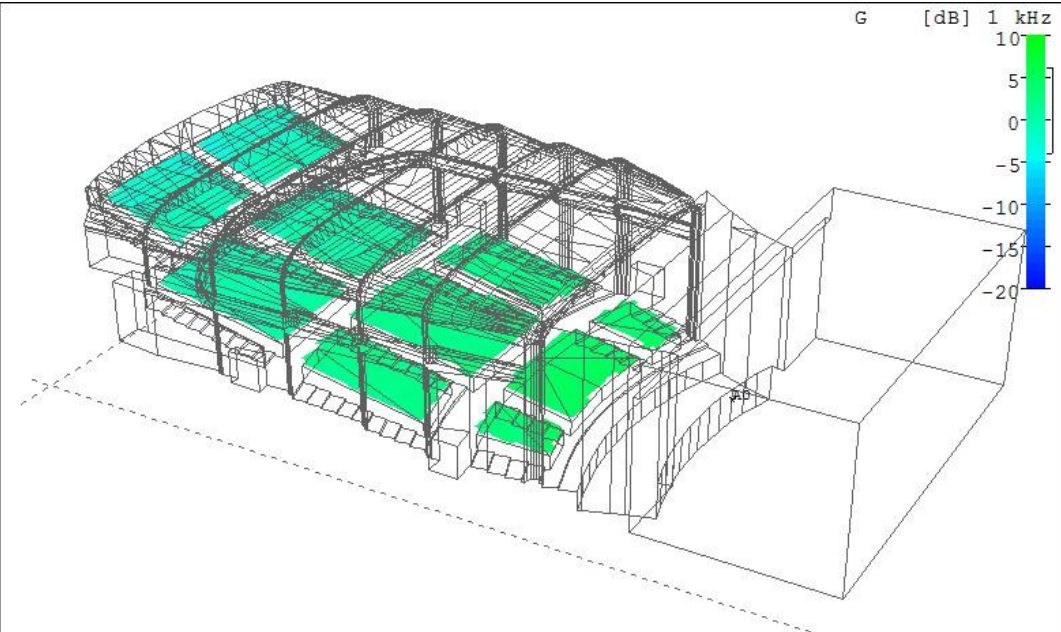
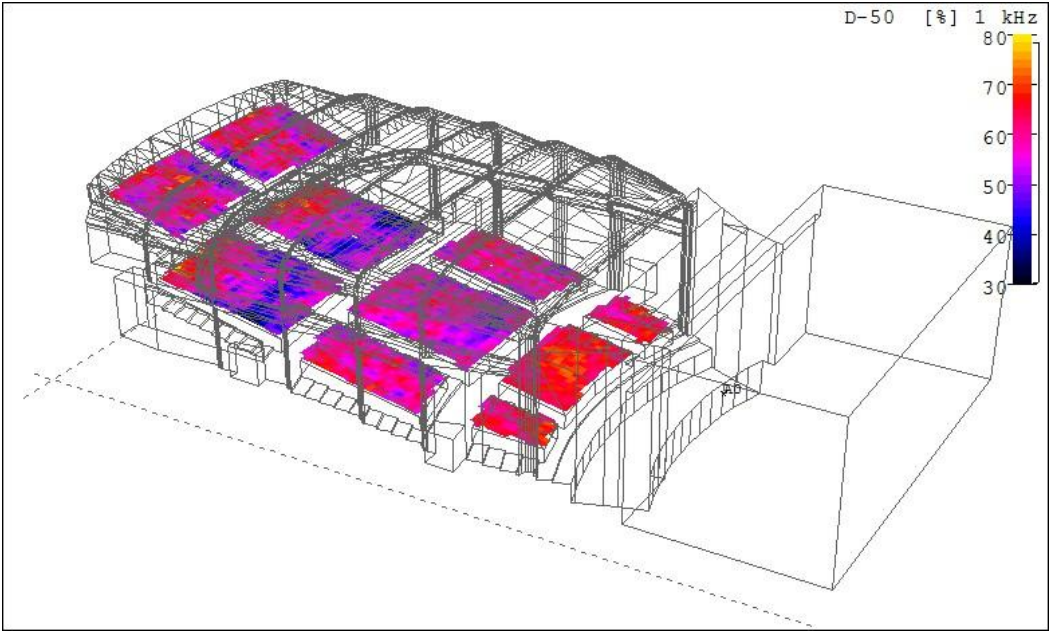
I risultati della simulazione sono congruenti al limite inferiore previsto nel progetto acustico

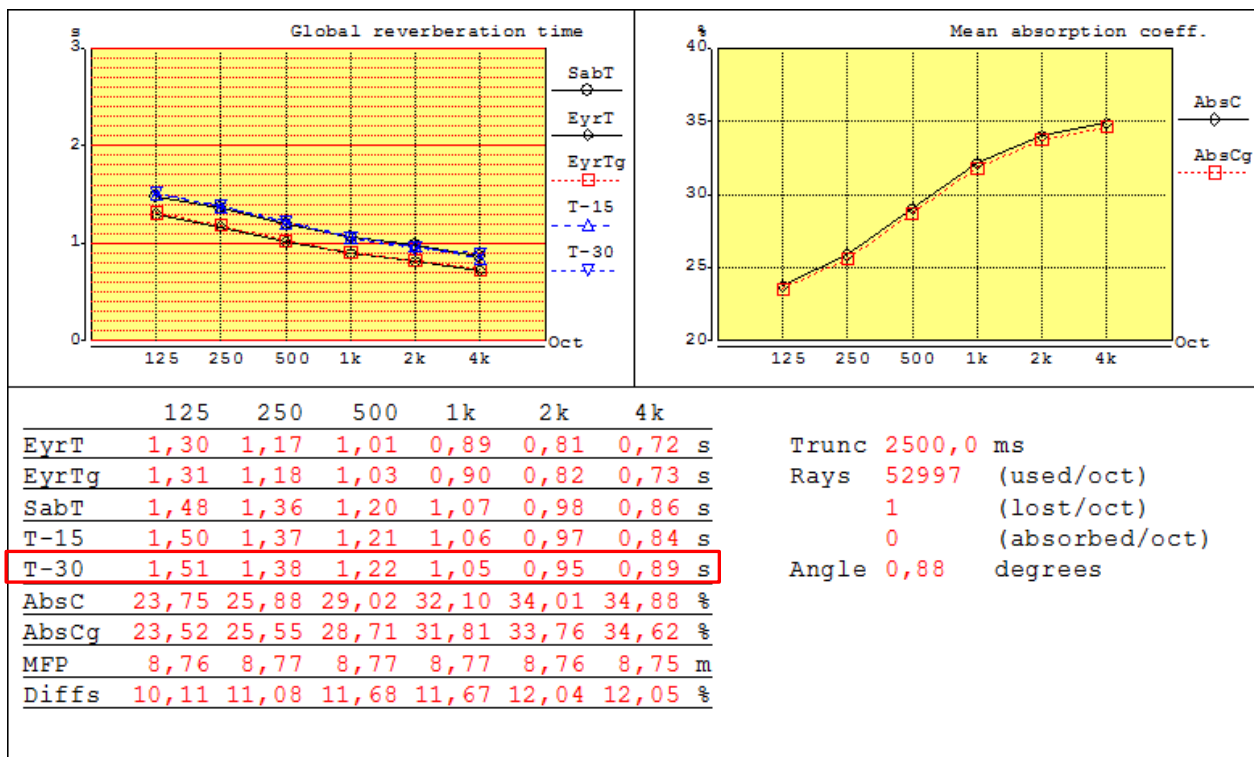
$$T_{1 \text{ kHz}} = 1.3 \text{ s}$$

2.1.2 - Configurazione 02 – prosa

Le tende sono abbassate nella parte alta delle campate sopra fino il parapetto di galleria.

Nella parte bassa sono visibili solo nelle ultime due campate





Reverberation Time (RT)

	Destinazione d'uso	Reverberation Time T_{30}
	Congressi	$0.8 < T_{30} < 1.1$
	prosa	$0.7 < T_{30} < 1.1$
	Opera e Balletto Classico	$1.3 < T_{30} < 1.6$

I risultati della simulazione sono congruenti con l'obiettivi definiti nel progetto acustico