

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PARMA
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Industriale

XXIII Ciclo

Studio e analisi acustiche di uno spazio polivalente

Tutore:

Prof. Ing. Angelo Farina

Coordinatore:

Dott. Ing. Paolo Galaverna

Tesi di Dottorato di Ing. Francesca Nucibella

SOMMARIO

1	Premessa	5
2	Introduzione	8
3	L'acustica delle sale da concerto e per la fruizione del parlato	9
3.1	Breve richiamo di un modello semplice per il suono in una sala	9
3.2	Attributi percettivi e parametri oggettivi	11
3.2.1	Riverberazione e qualità dell'ascolto	12
3.2.2	Chiarezza	15
3.2.3	Riflessioni e spazialità	17
3.2.4	Livello sonoro	19
3.2.5	Spettro acustico e risposta in frequenza	20
3.2.6	Intelligibilità	21
3.3	Valutazione soggettiva	24
3.4	Valutazione dei parametri	26
3.5	Conclusioni	27
4	Acustica in edilizia	28
4.1	Introduzione	28
4.2	Riferimenti legislativi	29
4.3	D.P.C.M. 5 dicembre 1997	30
4.4	Calcoli di progetto secondo la UNI/TR 11175	31
4.5	L'abaco delle murature	35
4.6	Isolamento acustico di facciata	35
4.7	Livello di rumore di calpestio	36
4.8	Isolamento acustico fra ambienti	37
5	Il progetto	39
5.1	Inquadramento dell'area di studio nella pianificazione urbana	39
5.2	Descrizione dell'insediamento in progetto	41
5.3	Inquadramento nella zonizzazione acustica comunale	42
5.4	Casa della cultura – criteri e obiettivi di progetto	44
5.5	Prospetti e sezioni	48
5.6	Scelta degli spazi interni	51
5.6.1	Schemi funzionali e di superfici	52
5.7	Caratterizzazione dello stato di fatto	57
5.7.1	Rilievi fonometrici	59
5.7.2	Impatto acustico	61
5.7.3	Considerazioni sullo stato di fatto nella progettazione acustica	62
6	Processo evolutivo dell'assetto acustico	63
6.1	Premessa	63
6.2	Parma e la musica	63
6.2.1	Le sale di Parma	64
6.2.1.1	Il Teatro Regio	64

6.2.1.2	Auditorium Paganini	66
6.2.2	Confronto Regio - Paganini	68
6.3	L'idea della tipologia multi purpose hall	69
6.3.1	Esempi illustri	70
6.4	La scelta definitiva	86
6.4.1	Gli elementi innovatori	87
6.5	Iter progettuale	89
6.5.1	Il punto di partenza	92
6.5.2	Obiettivi acustico-architettonici	93
7	L' Auditorium	95
7.1	Progettazione acustica	95
7.1.1	Approccio	95
7.1.2	Geometria di base	96
7.1.3	La conformazione delle pareti	99
7.1.4	Composizione della copertura	102
7.1.5	La scelta dei materiali	103
7.1.6	Allestimenti	105
7.1.7	Studio previsionale del campo acustico all'interno della sala	106
7.1.7.1	Taratura del modello di calcolo	107
7.2	Analisi e risultati	112
7.2.1	Casi di studio	112
7.2.5	Osservazioni e migliorie	121
7.3	Progettazione dell'impianto di amplificazione sonora	122
8	Progettazione acustica del Teatro Lenz	128
8.1	Il teatro Lenz	128
8.2	La conformazione delle pareti	129
8.2.1	La scelta dei materiali	133
8.3	Studio previsionale del campo acustico all'interno della sala.	133
8.3.1	Tempo di riverbero ottimo	134
8.3.2	modello di calcolo	135
8.4	Casi di studio	137
8.4.1	parametri di configurazione	137
8.4.2	Risultati delle simulazioni	138
9	Conclusioni e sviluppi futuri	141
	Allegato A – Certificati di taratura	143
	Allegato B – Schede di Misura	144
	Allegato C – Ramsete	147
	Metodologia progettuale ed utilizzo del software	147
	Algoritmi di calcolo	148
	Impiego del programma	150
10	Bibliografia	151

Ai miei genitori

PREMESSA

1

La teoria della riverberazione enunciata da Sabine agli inizi di questo secolo ebbe l'importante conseguenza di far nascere una nuova disciplina: la scienza acustica ed in particolare l'acustica architettonica. Questa nuova scienza nacque con il preciso intento di comprendere i "meccanismi" del suono all'interno di ambienti chiusi e di come esso interagisce con l'ambiente stesso.

Fino agli anni '60, questa disciplina ebbe più un carattere conoscitivo che propositivo; si era infatti dischiuso un enorme mondo da esplorare con mezzi che erano tutti da costruirsi.

All'epoca, fra la fisica del suono e la progettazione architettonica, cominciò a stabilirsi un rapporto creativo, soprattutto per effetto di una migliore comprensione del significato soggettivo del fenomeno sonoro.

Negli anni '70 l'applicazione dei primi metodi psicometrici portò al rapido sviluppo nella comprensione del significato individuale del suono. Ciò rendeva possibile valutare le qualità acustiche individuali in maniera scientifica attestando al tempo stesso l'imprescindibile soggettività del fenomeno, misurabile su base scientifica solo come media statistica dei singoli dati. Lo strumento principale utilizzato era la cosiddetta scala di valutazione semantica: i vari soggetti-campione dovevano posizionare un segno lungo una linea agli estremi della quale si trovavano caratteristiche opposte ma riguardanti un'unica categoria. Il prodotto di questi studi fu l'individuazione di correlazioni tra criteri fisici e sensazioni individuali.

Furono i dati desunti da questo metodo il primo vero metro di giudizio a disposizione di chiunque volesse cercare di comprendere ed analizzare analiticamente qualsiasi spazio architettonico del punto di vista musicale. Le batterie di dati disponibili da quegli anni fino a noi per opera di autori quali Beranek, poi seguito da innumerevoli altri, non solo si rivelano preziose ancora oggi per la comprensione acustica delle sale ma anche per il metodo che ne deriva, che ancora oggi si presenta come forse la miglior metodologia di divulgazione delle qualità di un ambiente.

Esistono, infatti, ad oggi, tecniche di misurazione che dispongono di parametri più precisi e funzionali di quelli di una volta, ma l'immediatezza intuitiva di quelle valutazioni resta un dato fondamentale per chiunque non sia strettamente un tecnico o per chi voglia introdursi all'argomento. In particolare per chi fosse, dopo quell'epoca, un architetto o un tecnico acustico risultò imprescindibile lo studio di quei dati.

La sperimentazione successiva condusse inevitabilmente a risultati migliori ma anche discutibili rispetto ai precedenti, ciò dovuto ad una maggiore libertà conseguente a basi conoscitive più solide e alla sensazione, non del tutto esatta, di avere i mezzi teorici per poter plasmare un'entità - il suono

- che per centinaia d'anni si era resa sfuggente e misteriosa.

La collaborazione tra acustici ed architetti, a partire da quegli anni, non sono sempre state felici, in particolare quando l'uno o l'altro hanno avuto il controllo totale della progettazione. Ciò è sicuramente vero ma indubbiamente migliorabile. Se infatti fosse auspicabile la più stretta sinergia possibile fra le due figure professionali questo sarebbe ulteriormente migliorabile dall'unione di queste due figure in un solo progettista con un background culturale in entrambi i campi.

Un semplice esempio può dimostrare la validità della figura professionale così definita: il luogo in cui far sorgere la sala è fondamentale; se per un architetto un tale edificio posizionato nel punto giusto del tessuto urbano può rappresentare un'area di sviluppo importante, per un acustico questo dovrà essere un attento esame sotto il profilo del controllo delle vibrazioni ed i rumori.

E' raccomandabile cercare fin da subito un'area che racchiuda le migliori potenzialità in entrambi i campi per evitare che un aspetto sia di molto prevalente sull'altro. Inoltre, come vedremo, le decisioni iniziali riguardanti la forma della sala il suo volume e la sua capacità sono uno dei momenti fondamentali dove capacità e sensibilità sia architettonica che acustica devono forzatamente incontrarsi e dialogare per la migliore riuscita di un'opera.

Inevitabilmente si arriverebbe ad un punto di frizione nel caso il gusto delle due figure divergesse e la prima vittima sarebbe sicuramente il progetto stesso.

Tradizionalmente invece le due figure devono prima stabilire i propri ruoli ed i concetti di base sui quali lavorare, poi i metodi per il conseguimento dei risultati. Discutendo, facendo riferimento ad esempi conosciuti da entrambi, schizzando, la sala prende via via forma ad opera dell'architetto. Solo successivamente, in realtà, l'acustico entra realmente in gioco, ed è qui che esamina dal punto di vista sonoro progetti che pur non essendo esecutivi, sono comunque già ad un grado di definizione piuttosto avanzato.

Una terza figura si unisce alle due precedenti per rafforzare il rapporto che le lega, non dimenticando che gli studi di Sabine vennero effettuati proprio all'interno di edifici: la figura del compositore. Con l'introduzione dei mezzi elettroacustici delle composizioni musicali contemporanee, le possibilità di espressione musicale sono state notevolmente ampliate e di risultato è stato una crescente consapevolezza fra i compositori delle relazioni intrinseche fra la musica lo spazio architettonico. Stockhausen compose, negli anni 70, una serie di brani in cui fondamentale era la relazione fra spazio musica; introducendo mezzi elettroacustici che egli stesso progettava e giocando con la diversa provenienza di varie sorgenti acustiche - in particolare da stanze differenti poste su più piani all'interno di un particolare edificio. Ancora Stockhausen, già nel 1970, compose musica adatta ad essere riprodotto da 50 altoparlanti posizionati su un telaio di forma sferica: la musica ruotava da un altoparlante all'altro seguendo percorsi verticali e orizzontali, diagonali e spirali.

Oggigiorno vediamo il diffondersi di impianti sonori a costo relativamente modesto che cercano costantemente di riprodurre un ambiente sonoro il più possibile tridimensionale.

Risulta quindi chiaro che nelle composizioni musicali lo spazio fisico è fortemente coinvolto ed ha, inoltre, una valenza ricorsiva: sia lo spazio architettonico cerca di definire un ambiente sonoro che la riproduzione sonora cerca di ricreare un determinato ambiente (architettonico).

Risulta chiaro quanto il rapporto fra le figure professionali dell'acustico e dell'architetto possa essere fonte di un complesso equilibrio che deve delinearsi nella realizzazione di uno spazio per la musica o per lo spettacolo, e risulta altresì chiaro che questo sottile rapporto non può che essere migliorato

dall'unificazione di queste due figure.

Se da un lato la crescente specializzazione tipica dei nostri anni in tutte le discipline richiede conoscenze sempre più approfondite ma ristrette in quanto ad aree di interesse - proprio questa specializzazione ha bisogno di una completa integrazione fra i progettisti relativi ai diversi campi e quindi, nel caso non sia possibile che entrambe le discipline vengano sviluppate da un'unica persona, s'intuisce che l'aumento di conoscenze verso il campo complementare al proprio potrà solo che facilitare la collaborazione armoniosa fra i due progettisti.

INTRODUZIONE

2

La presente costituisce la documentazione riguardante l'analisi e lo studio della progettazione acustica di uno spazio costituente il nuovo complesso denominato "STU Pasubio" in corso di costruzione nella zona sud nell'ambito di via Pasubio della città di Parma.

Si tratta della costruzione ex novo di comparti e edifici di diversa fruizione.

Il complesso ideato dall'architetto catalano Oriol Capdevila dello studio dello studio MBM Arquitectes di Barcellona, contempla la pianificazione ed esecuzione acustiche dello studio Genesis di Paolo Galaverna di Parma. Oggetto della presente trattazione è l'analisi e il progetto acustico dell'area in esame eseguiti in collaborazione con detto studio.

L'obiettivo che il progetto si pone è di fungere da motore di sviluppo per un quartiere della città di Parma ormai centrale, ma ancora considerato marginale e periferico. Gli interventi si inseriscono quindi in un'operazione di riqualificazione globale, tanto dal punto di vista architettonico, come urbanistico e sociale, in un'area, quella di via Pasubio, affatto marginale, ma attualmente degradata. Nello specifico l'analisi acustica tratta di una nuova progettazione dell'edificio ex CSAC (Centro Studi e Archivio della Comunicazione), soggetto a risanamento conservativo, nonché ad un adeguamento funzionale per trasformarlo nella "Casa della cultura" del Comune di Parma.

L'analisi progettuale effettuata, comunque, non ha potuto prescindere dallo stato di fatto in cui si trova il complesso, già realizzato in alcune sue parti strutturali e in queste definito negli aspetti architettonici.

Il presente lavoro si sviluppa sulla base dei seguenti capitoli:

- Inquadramento dell'area di studio ed elementi descrittivi
- Riferimenti teorici di base
- Caratterizzazione dello stato di fatto
- Metodologia ed algoritmi di calcolo utilizzati
- Studio e analisi acustiche
- Conclusioni e sviluppi futuri

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

3

3.1 BREVE RICHIAMO DI UN MODELLO SEMPLICE PER IL SUONO IN UNA SALA

Si consideri l'esperienza di una battuta di mano sul palcoscenico di una sala. L'energia sonora causata dall'impatto delle mani viaggia alla velocità del suono nell'aria interagendo con i confini della sala e con gli oggetti presenti. Una quota, ovvero un pacchetto di energia, raggiunge per prima direttamente l'ascoltatore che comincia ad avvertire la presenza di un suono. Questo è il suono diretto. Successivamente egli viene attinto da pacchetti di energia che risultano tanto più in ritardo quanto più lungo è il cammino percorso e, in generale, tanto più attenuati quanto più numerose sono state le interazioni con i confini della sala e con il suo contenuto prima di giungere nel punto di osservazione (l'ascoltatore) e proseguire, poi, ulteriormente. La figura 4.1 riporta qualitativamente la registrazione nel tempo dei pacchetti di energia rilevati nel punto di osservazione.

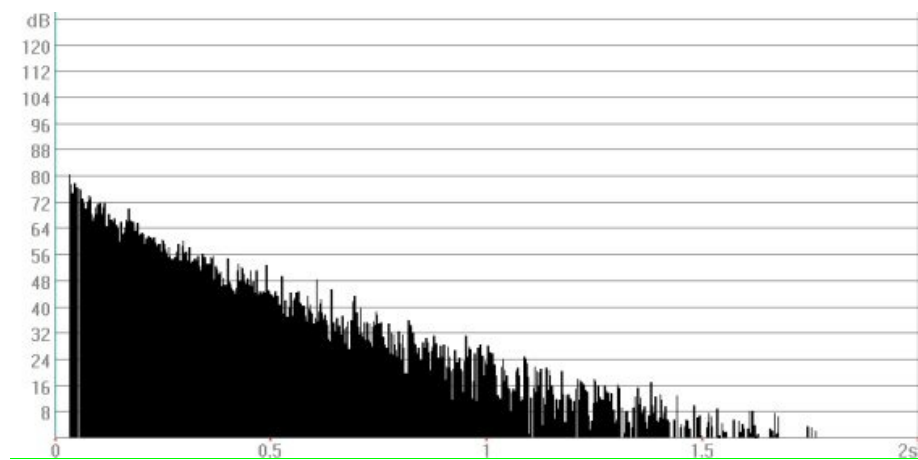


Figura 3.1 – Registrazione dell'energia dei pacchetti nel punto ricevente

La tecnologia moderna rende disponibile i mezzi elettroacustici per rilevare sperimentalmente una

caratteristica della trasmissione del suono da un punto sorgente ad un punto ricevente. In termini semplici, l'operazione consiste nella registrazione della pressione sonora in un punto di ricezione quando la sorgente emette un suono molto breve quale è, ad esempio, quello provocato da una battuta di mano. Questa *impronta digitale* acustica è nota come la risposta all'impulso dello specifico canale di trasmissione.

La figura 4.2 riporta il tracciato di una risposta all'impulso. La pressione sonora fluttua in modo apparentemente casuale estinguendosi gradualmente.

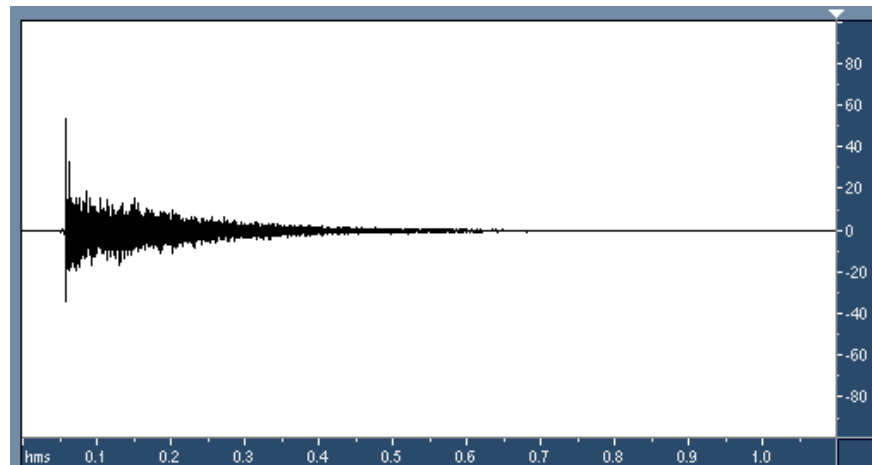


Figura 3. 2 - Risposta all'impulso in pressione in una sala

Se si traccia il quadrato della risposta all'impulso si ottiene una rappresentazione che usualmente è interpretata come una sequenza temporale di elementi di energia che attinge il punto di osservazione. Di fatto, il prodotto $p^2 dt$ è considerato proporzionale a un'energia elementare.

In tali ali tracciati, privi della parte negativa, è possibile riconoscere il suono diretto all'inizio, una serie di riflessioni più intense ed isolate ed, infine, l'inizio di una sequenza molto densa di riflessioni la cui energia decresce nel tempo. In questo ecogramma energetico si usa distinguere, oltre il suono diretto, il suono di prima riflessione, collocato normalmente nei primi 80-100 ms a partire dall'istante di arrivo de suono diretto, posto come $t=0$, nonché la riverberazione susseguente.

In realtà in natura non esistono sorgenti puramente impulsive di durata sufficientemente breve rispetto alla risoluzione temporale voluta ed in grado di assicurare un adeguato apporto energetico a tutte le frequenze; perciò le risposte all'impulso sperimentali dipendono irrinunciabilmente dal tipo di sorgente utilizzata. Per superare questo ostacolo si utilizzano l'operazione matematica della convoluzione e la trasformata di Fourier.

In un ambiente caratterizzato da una risposta all'impulso $g(t)$ viene posizionata una sorgente $s(t)$ non impulsiva; un ricevitore raccoglie il segnale $p(t)$, dato da:

$$p(t) = s(t) * g(t)$$

dove l'asterisco indica l'operazione di convoluzione che matematicamente corrisponde a :

$$p(t') = \int_0^{\infty} s(t'-t) \cdot g(t) dt$$

Si vanno in pratica a sommare in corrispondenza dell'istante t' le risposte del sistema che competono ad ogni singolo elemento di segnale emesso dalla sorgente.

Effettuando a questo punto la trasformata di Fourier delle tre funzioni reali nel dominio del tempo $s(t)$, $g(t)$ e $p(t)$, si ottengono tre funzioni complesse nel dominio della frequenza $S(f)$, $G(f)$ e $P(f)$, per mezzo delle quali è possibile tradurre la convoluzione nel semplice prodotto fra gli spettri complessi delle funzioni di partenza.

La trasformata di Fourier, operazione matematica normalmente usata per ottenere la distribuzione in frequenza di un segnale, è definibile con la relazione:

$$g(t) = IFFT \left[\frac{FFT[p(t)]}{FFT[s(t)]} \right]$$

da cui:

$$Q(f) = \int_{-\infty}^{\infty} q(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

3.2 ATTRIBUTI PERCETTIVI E PARAMETRI OGGETTIVI

Un attributo percettivo è una qualità riconoscibile nell'esperienza uditiva globale. Ad esempio un suono può apparire più o meno forte o piuttosto debole. Questo giudizio suggerisce l'esistenza di una scala psicologica in base alla quale viene ordinata la sensazione di *intensità percepita* dovuta al giudizio dell'ascoltatore sulla qualità percepita durante un'esperienza uditiva.

Nella letteratura specializzata sono riportati numerosi attributi relativi alla percezione di un evento in una sala da concerto. La loro importanza non è condivisa in pari grado da studiosi diversi. Beranek (1996) ritiene che, nonostante il loro numero può essere aumentato, i diciotto attributi da lui riportati possono tenere conto di tutti gli aspetti più importanti della musica eseguita in uno spazio chiuso.

Infine, egli lascia trasparire che per definire la bontà acustica di una sala da concerto sono necessari almeno sei descrittori fisici indipendenti. Barron (1993) ritiene che la qualità del suono in una sala necessita di almeno cinque dimensioni. Ando (1985) la descrive come combinazione di quattro parametri oggettivi.

Risulta dunque chiaro che dalla prima definizione di tempo di riverbero di Sabine, fino alle recenti teorie ed alle ultime tecniche di registrazione e misurazione binaurale, tali parametri si sono moltiplicati, fino a far nascere il bisogno di un riordino sistematico.

Di seguito saranno riportato alcuni parametri oggettivi e alcuni attributi percettivi ad essi legati più strettamente.

3.2.1 RIVERBERAZIONE E QUALITÀ DELL'ASCOLTO

Il tempo di riverberazione è definito come l'intervallo di tempo necessario affinché, al cessare dell'attività della sorgente, la densità di energia sonora si riduca ad un milionesimo del valore iniziale, o, ugualmente, affinché il livello della pressione sonora discenda di 60 dB. Questo è stato il primo importante parametro fisico in grado di fornire delle informazioni sulla qualità acustica di un ambiente chiuso; esso fu proposto agli inizi del 900 da Sabine. Egli, in base ad una serie di rilievi sperimentali, concluse che il tempo di riverberazione poteva esprimersi, con buona approssimazione, attraverso la seguente relazione, applicabile agli ambienti chiusi:

$$T = 0.16 \cdot \frac{V}{\sum_i (\alpha \cdot S_i)}$$

dove:

V = volume dell'ambiente in m³

α_i = coefficienti di assorbimento apparente delle superfici

S_i = superficie i-esima, in m².

Successivamente, basandosi sull'acustica statistica, Eyring modificò questa formula introducendo nuovi parametri; inoltre è stata proposta anche una formula che tiene conto dell'assorbimento dell'aria.

$$T = -0.161 \cdot \frac{V}{S_t \cdot \ln(r_m)}$$

r_m : coefficiente di riflessione medio delle pareti

$$r_m = (1 - \alpha)$$

Il campo sonoro può essere visto come la somma di due contributi: il campo diretto ed il campo riverberante. Dall'andamento nel tempo e nello spazio dei due singoli contributi e dal loro bilanciamento derivano tutte le caratteristiche acustiche di una sala. Nella maggior parte dei casi il campo riverberante assume un ruolo determinante anche nel garantire un livello di energia sonora sufficiente ai fini dell'ascolto anche a notevole distanza dalla sorgente, cosa che non sarebbe possibile con il solo contributo del campo diretto, senza ricorrere all'amplificazione e alla diffusione artificiale del suono.

Non tutta l'energia di riverberazione torna però utile alla corretta intelligibilità dei segnali emessi dalla sorgente; al contrario buona parte di essa finisce spesso per costituire una sorta di disturbo del tutto indesiderabile.

Questo fatto è evidentemente connesso alla natura del suono dovuto alla riverberazione, ma è anche da mettere in relazione alla struttura temporale del messaggio sonoro e ai meccanismi propri dell'udito.

In un ambiente chiuso un ascoltatore riceve, oltre al segnale acustico proveniente direttamente dalla sorgente, anche la riverberazione residua dei segnali emessi in precedenza.

È facilmente comprensibile, infatti, come l'energia sonora irradiata in un certo istante e che perviene

direttamente o dopo una o più riflessioni in un certo punto, non vi possa arrivare tutta nello stesso momento, ma in una serie di istanti successivi, in ragione delle diverse lunghezze dei cammini percorsi.

Ora, se il messaggio sonoro emesso dalla sorgente è costituito da una successione di segnali diversi e di breve durata, è chiaro che la riverberazione di ogni segnale costituirà un ostacolo per la corretta identificazione dei segnali successivi.

È questo il caso del linguaggio parlato, in cui suoni elementari (fonemi) aventi carattere relativamente stazionario (vocali e alcune consonanti) si alternano con altri suoni aventi il carattere di brevi transitori (consonanti esplosive).

Più complesso è il caso della musica, perchè mentre per il parlato l'interesse di un ascoltatore sta dichiaratamente nel percepire ogni fonema con la massima chiarezza, e quindi non mascherato da un suono di riverberazione, con la musica è indispensabile la presenza di un certo grado di riverberazione, variabile a seconda del genere musicale, indispensabile per ottenere certi effetti benefici quali il mescolamento dei suoni (amalgama) ed il legamento delle note.

In relazione alla discontinuità del messaggio sonoro, assume poi particolare importanza il potere di risoluzione temporale dell'udito, ossia la capacità di udire due suoni come distinti al ridursi dell'intervallo temporale che li separa.

Dalla psicoacustica è infatti noto come l'udito, mentre riesce a percepire due suoni diversi nello stesso istante, tende invece a confondere due suoni uguali (di uguale frequenza) percepiti fino a qualche centesimo di secondo l'uno dall'altro (effetto di mascheramento); ciò dipende dal fatto che suoni di diversa frequenza vanno ad interessare terminazioni diverse del nervo acustico, per cui le sensazioni prodotte sono mantenute distinte. In pratica l'apparato uditivo umano si comporta, frequenza per frequenza, come un filtro integratore.

Ai fini dell'ascolto si può quindi ritenere interamente utile solo quella parte della riverberazione di un segnale che viene percepita con un ritardo, rispetto all'onda diretta, non superiore a qualche decina di millisecondi.

Per ritardi maggiori (di 30 ms circa), il suono di riverberazione è integrato solo parzialmente all'onda diretta e per una frazione che decresce progressivamente all'aumentare del ritardo fino a risultare completamente disturbante quando il ritardo supera il centinaio di millisecondi.

Si comprende ora l'importanza che assume in ogni punto di una sala la distribuzione temporale dell'energia dovuta al campo riverberante; una volta definita la natura del messaggio sonoro, il contributo della riverberazione può ritenersi utile, se non in certi casi indispensabile, unicamente se è corretto il ritardo con il quale viene percepito rispetto al contributo diretto della sorgente.

Il valore più opportuno del tempo di riverbero, cioè quello che è in grado di conferire ad una sala le migliori caratteristiche di ascolto, se si escludono i casi di amplificazione elettronica del suono, è il risultato di un compromesso fra due esigenze contrapposte:

- ridurre gli effetti dannosi di un eccessivo campo riverberante,
- assicurare, in tutti i punti della sala, un livello sonoro sufficiente per un'audizione senza sforzo.

Si è visto infatti come il tempo di riverbero ed il livello sonoro, a parità di altre condizioni, si mantengano entrambi inversamente proporzionali all'assorbimento globale dell'ambiente, per cui una variazione di quest'ultimo, in termini di qualità acustica, si ripercuote positivamente su uno, ma negativamente sull'altro.

In generale, al crescere delle dimensioni dell'ambiente si deve ammettere un certo aumento del tempo di riverbero ottimale, affinché non venga intollerabilmente penalizzato il livello sonoro per l'introduzione di materiale fonoassorbente.

Tale aumento non può comunque superare certi limiti per il progressivo deterioramento della qualità dell'ascolto, per cui, con il volume, deve tendenzialmente crescere anche la potenza sonora emessa dalla sorgente.

Il valore ottimale del tempo di riverbero non rimane perciò uguale in tutte le situazioni, ma varia in funzione del volume dell'ambiente e del tipo di sorgente sonora utilizzata.

La musica lenta, solenne e melodica, come per esempio quella di un organo, si adatta meglio ad un tempo di riverberazione lungo. La musica con un ritmo veloce richiede un tempo di riverberazione diverso dalla musica da camera.

Le indagini sperimentali effettuate con il passare degli anni su numerose sale destinate all'ascolto della musica e del parlato, unite ai giudizi espressi da critici e musicisti, hanno permesso di definire con buona approssimazione degli intervalli di variabilità ottimale per il tempo di riverbero in funzione dei fattori richiamati.

Si passa da poco meno di un secondo a poco più di due secondi, con i valori più elevati per la musica organistica ed i valori più bassi per l'ascolto della parola.

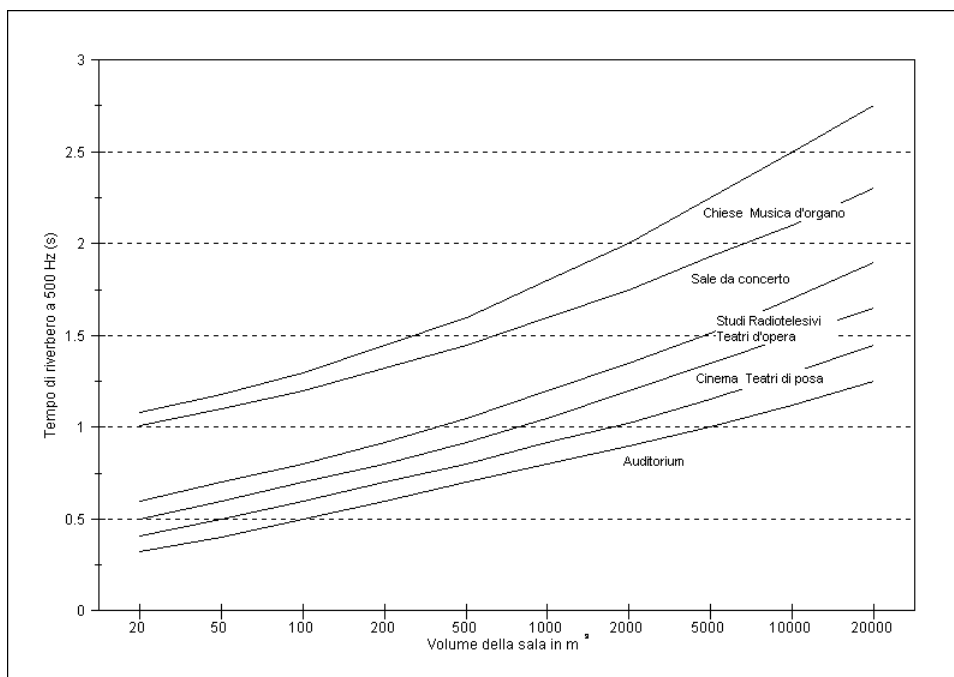


Figura 3.3 - Valori ottimali del tempo di riverberazione in funzione del volume della sala

Il tempo di riverbero nella definizione data da Sabine è stato a lungo utilizzato grazie alla semplicità della sua espressione e alla immediatezza della sua applicazione. Ma, sperimentalmente, è difficile registrare un decadimento di 60 dB, per cui generalmente ci si riferisce al tempo di riverbero classico di Sabine quando si estrapola la pendenza della curva di decadimento fra 5 e 35 dB al di sotto del livello di regime.

Analogamente sono stati definiti altri tipi di tempi di riverbero a seconda dell'intervallo in cui è

estrapolata la pendenza della retta di decadimento: T_{15} , T_{20} e T_{30} assumono come estremi dell'intervallo rispettivamente (-5,-20), (-5,-25) e (-5,-35). L' EDT (Early Decay Time), ovvero il tempo di decadimento iniziale proposto da Jordan (1968), è ottenuto interpolando i primi 10 dB del tracciato livello sonoro- tempo con una retta. L'EDT è il tempo corrispondente ad un decremento di 60 dB secondo tale retta, ed è più sensibile, rispetto al tempo di riverbero classico, alla posizione del punto di ascolto e alla geometria della sala. I suoi valori sono accettabili se compresi tra 1.4 e 2.8 secondi circa.

Sono stati proposti altri tempi di riverbero che utilizzano altri intervalli di decadimento: IRT (Initial Reverberatio Time) che viene calcolato estrapolando a -60 dB la pendenza media dei primi 15 dB del decadimento, e ANZ che considera l'intervallo dei primi 20 dB.

La curva da cui si ricava la pendenza non è in realtà la risposta all'impulso in pressione, troppo oscillante perché fornisca valori significativi, ma la curva di decadimento ottenuta con l'integrale di Schroeder, che ha un andamento monotono, che non lascia dubbi di estrapolazione.

La curva di decadimento, riferita come curva di Schroeder, descrive il modo in cui la riverberazione può essere percepita dagli ascoltatori, per esempio dopo la nota finale di un brano musicale.

Il decadimento doppio tipicamente avviene se l'assorbimento sonoro non è distribuito uniformemente, per esempio causa di un eccessivo assorbimento negli assi del pavimento - soffitto, lasciando un campo riverberante rimanendo tra una coppia o un quadruplo della dure pareti. Un altro esempio comune è la rimanente caduta energetica da una stanza secca accoppiata.

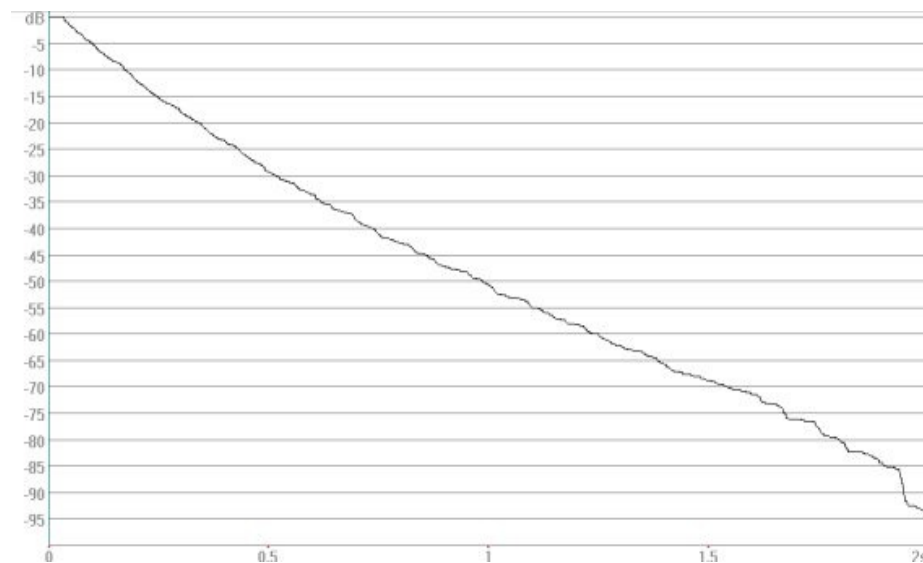


Figura 3-4 - Integrale di Schroeder di una risposta all'impulso.

L' intensità (Loudness) è un esempio di parametro percepito strettamente legato alla riverberazione.

3.2.2 CHIAREZZA

Nonostante gli sviluppi alla teoria di Sabine, si arrivò a constatare che il solo tempo di riverbero non basta a definire le qualità acustiche di una sala. Infatti esso definisce l'intervallo di tempo necessario affinché l'energia sonora si riduca di un certo numero di volte, ma senza tenere conto di come è

distribuita all'interno di tale intervallo. Uno dei primi criteri di valutazione del contributo utile del campo riverberante che ha trovato e trova tuttora impiego nella progettazione acustica delle grandi sale è quello che si basa sull'analisi dell'andamento delle prime riflessioni.

In un ambiente di grandi dimensioni, sono poche le riflessioni che possono raggiungere gli ascoltatori entro 30-40 ms dall'arrivo dell'onda diretta; se la forma ed i materiali di una sala non sono adeguatamente predisposti, può accadere che già la prima riflessione, solitamente la più intensa, pervenga agli ascoltatori con un ritardo superiore.

L. L. Beranek, in seguito ad una ricerca condotta su numerose sale da teatro e concerto, concluse che altre caratteristiche di un campo riverberante possono compensare tempi di riverberazione non adeguati, e fra queste trovò che la più importante è il tempo di ritardo della prima forte riflessione rispetto al suono diretto: questo parametro è conosciuto come Intervallo Temporale di Ritardo Iniziale *ITDG* (Initial Time Delay Gap).

Il "successo" dell'*ITDG*, è da attribuire, in parte, anche alla possibilità di prevederne facilmente il valore mediante semplici costruzioni geometriche.

Analizzando il grafico di una risposta all'impulso di una sala ci si accorge della complessità del fenomeno e di come la sua parte iniziale possa cambiare a seconda del punto in cui è stata rilevata, mentre la coda tenda ad essere più o meno simile.

Questo parametro, secondo lo studio compiuto da Y. Ando, risulta influenzare direttamente la qualità dell'ascolto in una sala: in particolare essa risulta essere maggiore tanto più breve è l'*ITDG*.

La procedura di misura dovrebbe essere di carattere geometrico, basandosi sulla costruzione dei percorsi medi effettuati sulla base di pianta e prospetti della sala.

In realtà, si procede alla misurazione direttamente sul grafico della risposta all'impulso, rilevando, tramite computer, i tempi d'arrivo dell'onda diretta e della prima riflessione.

Tuttavia, qualora siano presenti più di una riflessione in un intervallo di tempo molto ristretto, la prima onda riflessa può risultare di non chiara individuazione: in tal caso la determinazione dell'*ITDG* risulta affetta da errori sistematici.

Secondo tali ricerche la trasparenza è ben correlata dall'Indice di chiarezza *C* (Klarheitsmass) espresso in dB:

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

La limitazione dell'energia utile ad 80 ms deriva dalla considerazione che l'intervallo di integrazione dell'orecchio umano è più lungo per la musica che per il parlato e che i transitori della maggior parte degli strumenti musicali hanno una durata minore di 100 ms.

L' estremo di integrazione a 50 ms invece definisce l'indice di chiarezza *C50*, caratteristico per il parlato:

$$C50 = 10 \log \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{50ms}^{\infty} p^2(t) dt} \quad \text{in dB}$$

Il valore limite, espresso in dB, dell'indice di chiarezza che separa i campi di C ai quali è associata una trasparenza eccessiva od una trasparenza insufficiente è:

$$C_g = 0 \pm 1.6$$

I criteri della frazione energetica del tipo di quelli precedenti sono stati oggetto di critiche negative in quanto il limite netto per l'integrazione della pressione quadratica produce una forte variazione del risultato a seconda che una riflessione intensa capiti immediatamente a monte o a valle del limite scelto, e ciò non corrisponde ad un analogo comportamento della sensazione uditiva.

Per eliminare questo inconveniente sono stati proposti parametri in cui gli elementi di energia utile $p^2(t)dt$ sono pesati con una funzione dipendente dall'istante di arrivo e parametri che definiscono l'istante in cui l'energia utile è una frazione preassegnata dell'energia totale.

Nell'ambito di tali parametri, Cremer e Kürer hanno introdotto come misura della chiarezza l'istante baricentrico dell'energia (Schwerpunktzeit), meglio conosciuto come tempo baricentrico medio, t_s , misurato in secondi e definito dalla relazione:

$$t_s = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}.$$

Dalle indagini svolte da Kürer, risulta che t_s è molto sensibile alla posizione del punto d'ascolto in una sala e che è ben correlato all'intelligibilità percentuale delle sillabe, come pure alla chiarezza della musica nelle sale da concerto.

Per la musica sinfonica per esempio il valore consigliato di t_s è inferiore ai 140 ms, mentre per l'ascolto del parlato è ideale un valore inferiore a 50 ms. La Scala di Milano, La Pergola di Firenze e il Teatro Comunale di Bologna hanno rispettivamente t_s medio pari a 107 ms, 98 ms e 113 ms, mentre La Sala Europa di Bologna, progettata per dibattiti e conferenze, ha un t_s medio di 56 ms.

3.2.3 RIFLESSIONI E SPAZIALITÀ

La sensazione acustica che un individuo prova in un ambiente chiuso, una volta raggiunto da un certo messaggio sonoro, dipende, oltre che dalla intensità e dalla caratterizzazione temporale del segnale, anche dalla sua caratterizzazione spaziale. In altre parole, se i parametri fin qui analizzati potevano venire misurati con un solo microfono omnidirezionale, ciò non sarà più vero per dei parametri che dovranno darci delle informazioni anche sulla direzione d'arrivo dell'energia sonora.

Fatta eccezione per alcuni fenomeni di eco, l'udito non riesce ad identificare la direzione di provenienza di ogni riflessione della moltitudine che lo sollecita, ma elabora quella particolare sensazione cui si fa riferimento con il termine "riflessione spaziale".

Si tratta dell'impressione acustica di essere in uno spazio tridimensionale, di sentirsi "avvolti" dal suono e di percepire la fonte sonora più estesa di quanto lo sia in realtà.

Perché sorga tale sensazione è sufficiente che al campo sonoro diretto siano associate poche riflessioni che:

- siano prime riflessioni, cioè il loro ritardo rispetto al suono diretto non superi circa i 100 ms;
- giungano all'ascoltatore da direzioni laterali;
- abbiano un'intensità relativa a quella del suono diretto maggiore di una certa soglia;

- siano pressochè mutuamente incoerenti, condizione che è in buona parte automaticamente soddisfatta in una sala da concerto.

Tali considerazioni furono supportate da una notevole mole di risultati di indagine sull'impressione spaziale riportati da Barron e da Marshall. Tali ricerche hanno portato gli autori a concludere che il grado di impressione spaziale è una funzione lineare crescente della frazione della prima energia L_f , definita dalla relazione:

$$L_f = \frac{\sum_5^{80ms} r \cdot \cos \Phi}{\sum_0^{80ms} r}.$$

In questa relazione il numeratore rappresenta la somma dell'energia sonora r associata a ciascuna riflessione che giunge nel punto di ascolto nell'intervallo di tempo 5-80 ms ($t = 0$ è l'istante di arrivo dell'onda diretta), pesata secondo il coseno dell'angolo Φ formato dalla direzione di arrivo della direzione della riflessione con la retta passante per i timpani dell'ascoltatore che guarda la sorgente sonora. Il denominatore rappresenta l'energia totale, compresa quella associata all'onda diretta, che giunge all'ascoltatore nei primi 80 ms della risposta all'impulso.

Barron e Marshall, facendo anche riferimento a studi di Reichardt e Schimdt, forniscono il seguente legame fra il grado di impressione spaziale $S.I.$ (Spatial Impression) e la frazione della prima energia laterale L_f :

$$S.I. = 14.5L_f - 0.7 = 14.5 \cdot (L_f - 0.05).$$

Da esperimenti di Keet e di Kuhl si comprese come l'impressione spaziale dipendesse marcatamente dal livello di ascolto; per cercare di tenere conto anche di questa dipendenza, Barron e Marshall proposero, in via di tentativo, una versione modificata della definizione della $S.I.$:

$$S.I. = 14.5 \cdot (L_f - 0.05) + \frac{L - L_0}{4.5}$$

dove:

- L = livello medio nel punto di ascolto
- L_0 = livello di soglia per l'influenza del livello d'ascolto sulla $S.I.$ (80-90 dB)

Come criterio per l'impressione spaziale Jordan ha suggerito l'Efficienza laterale LE (Lateral Efficiency):

$$LE = \frac{\int_{25ms}^{80ms} p_{\infty}^2(t) dt}{\int_0^{80ms} p_0^2(t) dt}.$$

L'efficienza laterale, che pure appartiene alla classe dei parametri basati sulla selezione temporale e direzionale dell'energia riflessa, ha il pregio fondamentale di poter essere facilmente misurata nella pratica. Infatti p_{∞} è la pressione rilevata con un microfono a caratteristica dipolare (microfono sensibile al gradiente della pressione del primo ordine), orientato con una direzione di sensibilità nulla verso la fonte sonora, e p_0 è la pressione sonora rilevata con un microfono a caratteristica sferica (ordine zero). La LE appare alquanto simile alla frazione della prima energia laterale L_f . Oltre che nel ristretto intervallo di integrazione dell'energia utile al numeratore, la differenza fra LE ed L_f consiste nel peso direzionale dell'energia in quanto in L_f è l'energia che è pesata con $\cos \Phi$, mentre in LE è la pressione sonora che è pesata con $\cos \Phi$. Jordan, facendo riferimento a risposte impulsive filtrate nel campo delle frequenze interessanti le bande di ottava con centro 500 Hz e 1

kHz, suggerisce come ottimali i valori superiori allo 0.2-0.3.

Una nuova versione della ISO/CD 3382 introduce altre due varianti alla definizione di Energia Laterale:

$$LF = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_L^2(t) dt}{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}$$

dove $p_L(t)$ è la pressione istantanea misurata con un microfono con caratteristica dipolare, puntato in modo da avere la massima sensibilità su di un asse perpendicolare alla congiungente la testa dell'ascoltatore e la sorgente sonora.

Dato che la direttività del microfono è essenzialmente descritta dalla funzione del coseno e i valori della pressione sono elevati al quadrato, la frazione di energia laterale risultante varia con il quadrato del coseno dell'angolo. Come alternativa, per ottenere un valore della frazione di energia laterale che vari con il coseno dell'angolo, la ISO/CD 3382 propone la seguente approssimazione:

$$LFC = \frac{\int_{5ms}^{80ms} |p_L(t) \cdot p(t)| dt}{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}$$

che si pensa sia soggettivamente più accurata.

3.2.4 LIVELLO SONORO

Normalmente in acustica vengono definiti vari tipi di livello:

- livello di pressione sonora; esso è definito da (in dB):

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0}$$

dove p_0 = pressione sonora di riferimento = $2 \cdot 10^{-5}$ [Pa];

- livello di potenza sonora; esso è definito da (in dB):

$$L_Q = 10 \log \frac{Q}{Q_0}$$

dove Q_0 = potenza sonora di riferimento = 10^{-12} [W];

- livello di intensità sonora; esso è definito da (in dB):

$$L_I = 20 \log \frac{I}{I_0}$$

dove I_0 = intensità sonora di riferimento = $2 \cdot 10^{-5} \left[\frac{W}{m^2} \right]$;

- livello di densità sonora; esso è definito da (in dB):

$$L_D = 10 \log \frac{D}{D_0}$$

dove D_0 = densità sonora di riferimento = $3 \cdot 10^{-15} \left[\frac{J}{m^3} \right]$.

In condizioni ambientali normali (pressione atmosferica, temperatura ambiente di 20° C) si considera $L_p \approx L_I \approx L_D$.

A queste definizioni (fisiche) dei livelli sonori, vanno applicate alcune correzioni per avvicinarli alle sensazioni psicofisiche, descritte dalle curve di isofonia; si tratta delle curve di ponderazione, le quali modificano tali parametri: in particolare la curva di ponderazione A fa coincidere la linea isofonica dei toni puri a 40 phon.

I fonometri normalmente impiegati dispongono di questo sistema di pesatura.

L'importanza assunta dal livello negli studi di qualificazione acustica degli ambienti chiusi è stata ampiamente dimostrata. Ando ha potuto verificare l'importanza di questo parametro, a tale scopo ha costruito diagrammi di preferenza, basandosi su studi di correlazione compiuti con la tecnica dei giudizi comparativi.

3.2.5 SPETTRO ACUSTICO E RISPOSTA IN FREQUENZA

Negli studi acustici prettamente musicali, riveste una certa importanza la sensazione dell'altezza dei suoni e della loro variazione. Un tono, mantenuto a frequenza costante, al variare dell'intensità, provoca variazione della sensazione psicofisica di altezza, e, dualmente, per avere la stessa sensazione di intensità, è necessario modificarne l'altezza (ad es., un suono a 300 Hz, all'aumento dell'intensità, induce la sensazione di diminuzione dell'altezza). Anche la capacità discriminatoria dell'orecchio di discernere la differenza delle frequenze è funzione dell'altezza e dell'intensità dei suoni (alle frequenze centrali la "soglia differenziale di frequenza" è molto più contenuta rispetto alle alte o alle basse frequenze).

Lo spettro acustico, nonché la risposta in frequenza di un ambiente chiuso, rappresenta, pertanto, un parametro indubbiamente rilevante, ma ampiamente sottovalutato dalle normali indagini sulla qualità acustica delle sale da concerto.

Normalmente per la risposta in frequenza si intende il rapporto algebrico fra lo spettro di uscita e quello di ingresso di particolari strumenti elettroacustici detti trasduttori (microfoni, altoparlanti, amplificatori, etc.).

Allo stesso modo ha senso, quindi, definire una "risposta in frequenza" per un ambiente chiuso, intendendo la capacità della sala di modificare la composizione spettrale della sorgente.

A tale scopo va notato come ciascun strumento musicale sia dotato di un proprio caratteristico spettro acustico, variabile anche fra strumenti dello stesso tipo (ciò che rende uno Stradivari un pezzo unico).

Il brano musicale giunge all'ascoltatore dopo aver subito numerose riflessioni nell'ambiente. Dacché il coefficiente di riflessione di ciascun materiale è variabile alle diverse frequenze, il segnale giungerà all'ascoltatore alterato nella sua composizione spettrale. Infatti, in alcune sale in cui erano impiegati materiali fonoassorbenti in modo eccessivo il suono risultava particolarmente "cupò".

Il contributo fornito dalla sala alla variazione del segnale musicale nel dominio della frequenza va inteso nella sua accezione positiva, in quanto esso deve contribuire alla creazione del suono alla stregua della cassa armonica di uno strumento. In genere i musicisti sono più portati ad apprezzare, per i rivestimenti dei locali, l'impiego di materiali simili a quelli usati per la costruzione del proprio strumento musicale (il legno in particolare).

La risposta in frequenza di un ambiente chiuso può essere ricavata senza eccessive difficoltà: è

sufficiente disporre della sua risposta all'impulso e trasformarla nel dominio delle frequenze attraverso la Trasformata di Fourier, ottenendone la funzione di trasferimento.

Non risulta, al contrario, ancora studiata la relazione che intercorre fra risposta in frequenza ed indice di preferenza dell'ascolto, e questo indubbiamente è un limite notevole da porre alla teoria di Ando.

L'unico parametro usato per valutare la risposta in frequenza di un ambiente è l'equilibrio tonale TB (Tonal Balance) definito dalla relazione:

$$TB = \frac{T_{10(2kHz)} - T_{10(250Hz)}}{3}$$

dove T_{10} è il tempo necessario affinché il livello di pressione sonora si riduca di 10 dB rispetto al valore iniziale. I valori raccomandati in letteratura sono nell'intorno di $TB = 0.1$ [s/ottava].

3.2.6 INTELLIGIBILITÀ

L'intelligibilità è una proprietà del segnale sonoro ricevuto da un ascoltatore: essa rappresenta la potenzialità, da parte dell'ascoltatore, di recepire il messaggio informativo contenuto nel campo sonoro stesso, indipendentemente dalla sua successiva intelligibilità. In generale l'intelligibilità dipende da:

- caratteristiche del canale di trasmissione (ambiente, microfono, altoparlante, etc.);
- tipo di segnale (musica, parlato, etc.);
- posizione ed orientamento della testa dell'ascoltatore.

Esistono due approcci radicalmente diversi per la misura dell'intelligibilità: il primo si basa sull'impiego di gruppi di ascolto, che debbono trascrivere su carta quanto sentono; l'intelligibilità viene poi misurata in base al numero di errori di trascrizione effettuati. Tale tecnica è applicabile sia impiegando come sorgente un segnale verbale (sillabe o parole, con senso o no), sia musica. Ovviamente richiede l'utilizzo di ascoltatori addestrati (ad esempio, per la musica è necessario disporre di ascoltatori che sappiano trascrivere le note dello spartito...), ed adeguate tecniche statistiche di analisi dei risultati. Sono disponibili già registrati su CD sia liste di sillabe e/o parole, sia brani musicali anecoici (cioè privi di riverberazione).

Il secondo approccio si basa su misure oggettive effettuate sul campo sonoro, impiegando come sorgente segnali di prova di vario genere. Poiché sono noti gli effetti che tali parametri oggettivi hanno sull'intelligibilità (misurata con le tecniche del primo tipo), è possibile stimare, a partire da essi, quali sarebbero i risultati di test di ascolto effettuati nelle stesse condizioni.

In particolare sono state sviluppate svariate tecniche di misura dell'intelligibilità basate su rilievi di tipo oggettivo; le più note sono:

- Signal to Noise Ratio (Lochner e Burger, 1958);
- Articulation Index (Kryter, 1962);
- Articulation Loss of Consonants (Peutz, 1971);
- Speech Interference Level (Beranek, 1971);
- Speech Transmission Index (Houtgast & Steeneken, 1980);
- Indice di Preferenza (Ando, 1985).

Esistono precisi rapporti fra intelligibilità e intelligibilità; la prima è condizione necessaria ma non

sufficiente per la seconda: ad esempio, in una sala silenziosa e con bassa riverberazione, si ha sicuramente una buona intelligibilità, ma la intelligibilità richiede che parlatore ed ascoltatore parlino la stessa lingua, e che vengano usate parole comprese nel bagaglio culturale di chi ascolta...

Va detto, però, che, in certa misura, si può avere una completa intelligibilità anche in presenza di scarsa intelligibilità: ciò dipende molto dalla prevedibilità del messaggio trasferito, nonché dalla motivazione e dall'interesse dell'ascoltatore, ed infine dalla presenza di sussidi non acustici alla intelligibilità (quali la lettura labiale, l'impiego di sussidi audiovisivi, etc.).

L'importanza della misura dell'intelligibilità dipende molto dallo scopo per cui l'ascoltatore viene ad essere investito del campo sonoro: ad esempio, il sistema di altoparlanti installato sulla pista di una discoteca non deve presentare necessariamente una buona intelligibilità (nemmeno per l'ascolto della musica), poiché si prefigge di suscitare nell'ascoltatore soprattutto emozioni, che ben poco hanno a che fare con la possibilità per lo stesso di trascrivere correttamente lo spartito musicale. Viceversa l'importanza è notevole in quei casi nei quali il trasferimento del contenuto informativo è funzionale alla presenza stessa dell'ascoltatore: si pensi alle aule, ai teatri, o semplicemente al sistema di altoparlanti di una stazione ferroviaria.

In tutti questi casi, si ritiene normalmente più pratica la misura dell'intelligibilità con tecniche oggettive: inoltre, in questo modo, si ha il vantaggio di poter specificare, non solo il valore numerico del descrittore di intelligibilità (per esempio lo *STI*), ma anche di alcuni dei parametri oggettivi che stanno alla base della sua determinazione, quale ad esempio il tempo di riverbero o il rumore di fondo. Ciò semplifica la stesura di capitolati d'appalto e normative che regolamentano le prestazioni acustiche di locali e di apparati. Ad esempio, il Decreto Ministeriale del 18/12/1975, che regola i requisiti acustici delle aule scolastiche, non prescrive un valore minimo di intelligibilità, ma indica direttamente dei valori ottimali del tempo di riverbero in funzione della frequenza e del volume dell'aula.

La misura dell'intelligibilità può essere influenzata in vario modo a seconda del contesto in cui viene effettuata: se per "contesto" si intende l'ambiente in cui si eseguono le prove, si può dire che l'intelligibilità è influenzata, almeno per il 50%, da esso (la restante parte dipendendo dalle caratteristiche della sorgente sonora). Se invece si considera come "contesto" tutto ciò che non fa parte del campo sonoro propriamente detto, come ad esempio il microclima, o gli effetti visivi, si deve notare che l'intelligibilità è definita come parametro puramente acustico, e che, pertanto, tali altri fattori non hanno alcun effetto su di esso (anche se, come già visto, possono influenzare la intelligibilità del messaggio).

L'intelligibilità è solitamente definita come una proprietà del campo sonoro nel punto di ascolto, intendendo con ciò il campo sonoro all'esterno dell'orecchio dell'ascoltatore. Recentemente, tuttavia, è stato fatto notare come la presenza dell'ascoltatore, ed, in particolare, la direttività del ricevitore "orecchio", siano in grado di influire sulla intelligibilità, che andrebbe, pertanto, valutata "al timpano" dell'ascoltatore (utilizzando, ad esempio, una testa artificiale). Si può pertanto ritenere che l'intelligibilità sia una variabile scalare, il cui valore varia nello spazio (e, normalmente, cresce in prossimità della sorgente sonora), e che dipende, oltre che dalla posizione, anche dall'orientamento del ricevitore. Tuttavia non esiste una "intelligibilità della sorgente", ma solo sorgenti che, in un determinato ambiente, danno luogo ad una intelligibilità più o meno elevata (a seconda del punto di ascolto considerato).

Si può dunque concludere che l'intelligibilità è sempre una proprietà del solo "canale di

trasmissione”, comprendendo in esso tutto l'insieme di apparati fisici, elettronici ed acustici che trasferiscono il suono originariamente emesso alle orecchie dell'ascoltatore. In tale “canale” deve essere compresa la particolare collocazione e l'orientamento dell'ascoltatore, ma non eventuali difetti uditivi dello stesso. Poiché normalmente si verifica una risposta lineare del canale di trasmissione, si può scomporre lo stesso in sezioni disposte in cascata, ciascuna delle quali produrrà un suo effetto sull'intelligibilità, che può essere quantificato misurando la stessa prima e dopo ciascuna sezione.

Si deve però precisare che l'intelligibilità dipende anche, in certa misura, dal tipo di segnale che deve essere trasferito: una sala da concerto può presentare un'ottima intelligibilità alla musica, ma quella per la parola può essere non così buona.

Come per la musica esistono diversi generi musicali, per ciascuno dei quali può verificarsi una diversa intelligibilità, così anche per il parlato esistono diverse lingue, inflessioni, intonazioni, esiste il canto in varie versioni, esiste la recita e la conversazione. Uno stesso canale di trasmissione può presentare diverse intelligibilità per ciascun diverso tipo di segnale acustico che vi viene introdotto. Ciò, però, non vuol dire che si possa definire una “intelligibilità all'origine”, anche se corrisponde a verità che alcune lingue sono più facilmente comprensibili di altre. Si può solo dire, ad esempio: “La sala Nervi ha una buona intelligibilità per la musica religiosa, una intelligibilità discreta per la musica romantica, una mediocre intelligibilità per le funzioni religiose, ed una pessima intelligibilità per le conferenze scientifiche”.

In realtà si osserva, allo stato attuale, che ben pochi metodi di misura oggettiva tengono conto delle peculiarità del segnale originario e dell'orientamento della testa dell'ascoltatore (praticamente solo l'Indice di Preferenza di Ando lo fa): pertanto la misura dell'intelligibilità, con tecnica oggettiva, tende ad essere effettivamente funzione del solo canale di trasmissione.

Per le misure di intelligibilità della parola è di comune utilizzo l'indice *RASTI*, introdotto da T. Houtgast e H. J. M. Steeneken quale derivazione dello *STI*. Essi descrivono la trasmissione del suono del sistema tramite la *MTF*, (Modulation Transfer Function) ossia una funzione di trasferimento in modulazione: essa quantifica fino a che punto le modulazioni del segnale originale sono ridotte, intese come funzione di modulazione in frequenza.

Il calcolo della *MTF* viene effettuato paragonando la modulazione di intensità fra il segnale di uscita ed il segnale di entrata del sistema, e calcolando il fattore di riduzione $m(F)$, la cui relazione con la risposta all'impulso è stata ricavata da M. Schroeder, oltre che da T. Houtgast e H. J. M. Steeneken, e nel caso del campo riverberante (sotto le ipotesi di sabinianità) è così definito:

$$m(F) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(2pF \cdot \frac{T}{13.8}\right)^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{(-S/N)/10}}$$

dove è:

- F = frequenza di modulazione (per $1/3$ d'ottava)
- T = tempo di riverberazione (s)
- S/N = rapporto segnale/rumore (dB)

Il fattore di riduzione risulta essere il prodotto di due termini, ciascuno dei quali mette in relazione l'effetto negativo prodotto da eccessiva riverberazione e/o da eccessivo rumore di fondo.

L'analisi attraverso $m(F)$ va compiuta per bande d'ottava, da 125 Hz fino a 8 KHz, a frequenze di modulazione precedenti per terzi d'ottava, a partire da 63.5 Hz, per un totale quindi di 98 dati.

Ogni valore di $m(F)$ rappresenta un punto del vettore MTF e, al termine del calcolo, si possono rappresentare delle curve per ogni banda d'ottava.

Al fine di ridurre la matrice così ottenuta (7×14) ad un solo valore, Houtgast e Steeneken propongono il calcolo di un "rapporto S/N apparente, così definito:

$$(S/N)_{app} = 10 \log \frac{m(F)}{1 - m(F)}$$

per poi normalizzarlo all'interno dell'intervallo (0,1), e quindi definire STI (Speed Transmission Index) nella maniera seguente:

$$STI = \frac{<(S/N)_{app}> + 15}{30}$$

escludendo pertanto le componenti di $(S/N)_{app}$ estranee all'intervallo (-15 dB, +15 dB), ossia ponendo:

- $STI = 1.0$ per $(S/N)_{app} \geq 15$ dB
- $STI = 0.0$ per $(S/N)_{app} \leq -15$ dB
- (per tutti i 98 punti).

L'introduzione dello STI , pur essendo esaustivo per ciò che riguarda le questioni di intelligibilità negli ambienti chiusi, non si è rivelato un parametro di altrettanta semplicità d'uso: per la grande maggioranza degli ambienti, infatti, l'insieme dei 98 dati forniti dallo STI rappresenta una griglia non necessaria per l'analisi: ciò ha spinto alla ricerca di una nuova procedura di valutazione basata su un campione limitato dei 98 punti calcolati dallo STI : ciò ha indotto alla definizione del $RASTI$ (Rapid Speech Transmission Index) basato su soli 9 punti.

3.3 VALUTAZIONE SOGGETTIVA

Il semplice accostamento dei valori numerici dei parametri oggettivi non basta a qualificare in ogni aspetto l'acustica di una sala. Questo perchè sono troppe le problematiche legate al gusto della persona e alle sue preferenze riguardo l'ascolto della musica. È necessario, quindi, poter correlare a tali valori sperimentali delle sensazioni di gusto (piacevoli, spiacevoli o di indifferenza) affinché, partendo da dati misurabili e ripetibili, si possa prevedere il "carattere" musicale di una sala. C'è chi è perfino arrivato a proporre che all'ingresso del teatro, lo spettatore possa scegliere il proprio posto non già secondo i criteri comuni, ma compilando un questionario riguardante i suoi gusti d'ascolto che, una volta elaborato, gli indichi, fra i posti disponibili, quelli più confacenti alle sue esigenze.

Lo studio psicoacustico della caratterizzazione acustica delle sale da concerto si è sviluppato in due direzioni: da un lato studiando simulazioni elettroacustiche del campo sonoro, dall'altro mediante questionari su sale esistenti.

Alcuni autori hanno discusso l'opportunità di formulare questionari simili a quelli proposti per lo studio dell'intelligibilità anche per i brani musicali; così sarebbe stata richiesta la capacità di riconoscere gli strumenti che suonavano, oppure di trascrivere brevi spezzoni di brani musicali tramite "dettato musicale", ma ciò avrebbe limitato la possibilità di rispondere ad una troppo stretta cerchia di professionisti e, soprattutto, non avrebbe risolto in maniera esaustiva il problema: infatti, a differenza delle sale per conferenza, l'esigenza di chiarezza e di "intelligibilità musicale" non riveste

una priorità assoluta.

Spesso anche fenomeni non acustici possono influenzare il giudizio complessivo, ad esempio la capacità di visuale della posizione occupata, la stessa comodità della poltrona, il benessere termoigrometrico dell'ambiente, etc.

Per poter giungere a risultati soddisfacenti è necessario avere a disposizione un numero considerevole di questionari, i cui quesiti si riferiscano a situazioni vicine nel tempo, e con le medesime condizioni, a parte la variazione di un unico parametro.

Al contrario studiare le situazioni acustiche di varie sale da concerto implica necessariamente un intervallo di tempo di giorni o addirittura di anni. Anche il segnale musicale, essendo variabile, comporterà un giudizio diverso e pure la posizione d'ascolto influirà sul giudizio.

La metodologia delle simulazioni elettroacustiche dei campi sonori prevede la registrazione di brani musicali tramite strumentazione binaurale (testa artificiale) eseguiti su varie sale e poi riproposti ai soggetti in analisi in camera anecoica. La tecnica, molto veloce, è stata impiegata nelle scuole di Gottingen e di Berlino. Nel primo caso sono stati impiegati spezzoni di brani musicali anecoici, riprodotti nei teatri tramite un altoparlante e registrati con testa artificiale e successivamente riproposti attraverso due altoparlanti in camera anecoica. Nel secondo caso si è provveduto alla registrazione in vari punti delle sale analizzate, sempre per mezzo della testa artificiale, di uno stesso brano musicale eseguito dalla stessa orchestra, e poi riproposto tramite cuffie stereofoniche. L'uso in serie di altoparlanti sia nella fase di eccitazione dell'ambiente di prova, sia in quella di restituzione in camera anecoica, provoca però distorsione del segnale e comunque modifiche oggettive al campo sonoro. L'impiego delle cuffie stereofoniche, invece, amplia esageratamente l'impressione di spazialità e di avvolgimento del campo sonoro.

A fianco di queste esperienze, si sono sviluppate alcune tecniche di simulazione elettroacustica al fine di rendere più agevole il confronto fra i vari segnali sonori. Con queste tecniche è possibile variare con continuità un solo parametro acustico. Lo stesso Y. Ando, per formulare la sua nota teoria, si è basato su studi di comparazione formulati su campi simulati elettroacusticamente, dai quali ha in seguito ricavato l'indipendenza di quattro parametri di base quali il livello sonoro, l'*ITDG*, il tempo di riverberazione e l'*IACC*. Essi si basavano esclusivamente sulla simulazione dell'effetto indotto dal suono diretto e dalle prime due riflessioni.

Le simulazioni del campo sonoro consentono modifiche rapidissime al sistema, quindi favoriscono lo studio di correlazione tramite comparazione dei segnali: ad un giudizio negativo si può far corrispondere una immediata modifica dell'ambiente e analizzare direttamente l'influenza che essa esercita sul giudizio complessivo. Ci riesce, inoltre, a simulare le mutazioni ambientali che si possono verificare nelle sale all'atto dell'esecuzione musicale.

In questa direzione ha svolto la propria ricerca A. C. Gade, proseguendo lo studio condotto da Barron e Marshall.

La grande versatilità fornita dalla sintetizzazione elettroacustica presenta però alcune grosse limitazioni, legate alla necessaria semplificazione nella descrizione del fenomeno acustico:

- numero molto limitato di prime riflessioni (al massimo 4 o 5);
- descrizione temporale e spaziale del campo molto "povera" in senso spazio-temporale;
- qualità del suono e fedeltà limitate, quindi suono e timbro degli strumenti musicali sono alterati;
- apporto energetico limitato: non si supera la metà dell'energia totale riflessa;

- necessità, in ogni caso, di disporre di una adeguata strumentazione digitale, nonché di ambienti atti a riproporre il segnale (camera anecoica).

Queste limitazioni hanno spinto A. C. Gade a differenziare le simulazioni elettroacustiche a seconda che l'indagine fosse rivolta a singoli esecutori solisti o a gruppi di musicisti orchestrali.

3.4 VALUTAZIONE DEI PARAMETRI

La valutazione combinata dei parametri è molto complicata, e non è definito un algoritmo che, dati i valori dei parametri, permette di calcolare un indice di bontà del livello acustico di una sala. Inoltre le condizioni acustiche di un ambiente dipendono enormemente dall'uso che se ne deve poi fare: in primo luogo se è adibito al parlato (auditorium), o alla musica, e in quest'ultimo caso bisogna distinguere fra musica lirica, sinfonica, da camera e così via. La valutazione dei parametri dunque va fatta caso per caso.

Un esempio eclatante di questa considerazione è il grafico che mostra "l'area" sonora adibita a parlato a musica in cui si vede come cambia il livello di pressione in base alla frequenza.

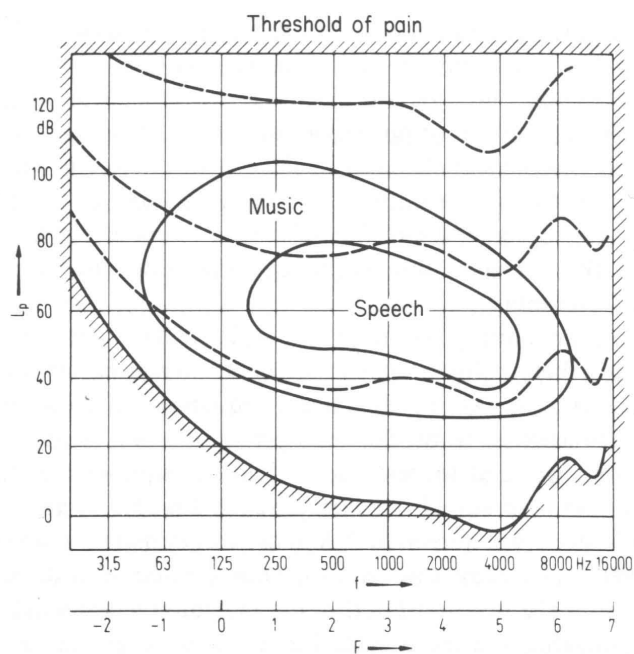


Fig 3.5 - Aree sonore

A Göttingen, per esempio, la definizione è il parametro che viene maggiormente preso in considerazione e in secondo luogo c'è il coefficiente binaurale; a Dresden si valuta di più la chiarezza, mentre a Berlino ha maggior importanza il fattore G. Ovviamente gli altri parametri vengono valutati anch'essi, ma quelli appena detti sono quelli a cui si pone maggior attenzione.

A Berlino e Dresden, poi, alti valori della definizione e valori di chiarezza oltre una certa soglia sono preferiti mentre a Göttingen si usano criteri quasi opposti. Infatti in base agli utilizzi e alla filosofia di

pensiero dei progettisti, i criteri con cui si scelgono i valori dei parametri cambiano, di conseguenza nonostante alcuni standard non esistono progetti ottimali di sale adibite a determinati utilizzi acustici. Di seguito riporto una tabella che mostra i valori misurati di riverbero in alcuni luoghi d'incontro di importanza mondiale, fra cui auditorium e teatri.

<i>Hall</i>	<i>V(m³)</i>	<i>f(Hz)</i>						<i>Data source</i>
		125	250	500	1000	2000	4000	
Council Chamber, empty, but with curtain closed	390	1.2	1.15	1.0	0.8	0.9	0.7	ITA
Large Physics Lecture Hall, ETH, Zürich	2 600	1.25	1.2	1.2	1.1	0.9	0.6	Furrer
Kresge Auditorium, Cambridge, Mass.	9 750	1.65	1.5	1.5	1.45	1.35	1.3	Beranek
Audit. Max. Univ., Hamburg	9 800	1.2	1.1	1.1	1.2	1.1	0.95	ITA
Benjamin-Franklin Congress Hall, Berlin: empty	13 000	1.9	1.85	1.4	1.2	1.2	1.15	ITA
occupied, calculated		1.6	1.6	1.25	1.15	1.15	1.1	
Aula Magna, Caracas	24 800	2.0	1.9	1.4	1.3	1.2	1.0	Beranek

Tabella 3.6 – Tempi di riverberazione per il parlato in sale occupate.

3.5 CONCLUSIONI

Nella progettazione acustica per gli spazi in progetto, sale da concerto (cosiddetti Auditorium, e teatro Lenz) e unità edilizie identificate come abitative o di sosta, (uffici, sale espositive ecc..), sarà necessario, nel primo caso, considerare i descrittori acustici oggettivi necessari a valutare la qualità del campo sonoro in un ambiente chiuso, nel secondo caso tutti quegli aspetti che influenzano la qualità acustica all'interno degli ambienti abitativi.

Vedremo nel prossimo capitolo come la valutazione dei requisiti acustici passivi rientra nel processo da seguire a partire dalla progettazione fino alla fase di realizzazione e di gestione. L'obiettivo deve essere quello di rispettare la legislazione vigente

4.1 INTRODUZIONE

Lo studio della trasmissione del rumore negli edifici e la caratterizzazione dei materiali con cui vengono realizzati ha assunto una notevole importanza negli ultimi tempi, sia per l'emanazione di una nuova legislazione cogente che per la cresciuta sensibilità al problema dell'inquinamento acustico.

Trattare di acustica edilizia significa prendere in considerazione tutti quegli aspetti che influenzano la qualità acustica all'interno degli ambienti abitativi. Si devono considerare innanzitutto le sorgenti di rumore che possono essere percepite all'interno degli edifici; queste possono essere esterne o interne. Va poi valutato il tipo di rumore prodotto dalle sorgenti (continuo, intermittente, tonale, impattivo, etc) e le modalità con cui si propaga all'interno dell'edificio (propagazione aerea o strutturale).

Risulta fondamentale, infine, considerare le modalità di attenuazione del rumore, dalla riduzione del rumore aereo mediante materiali isolanti e assorbenti allo smorzamento di rumori impattivi e vibrazioni strutturali mediante materiali anticalpestio, antivibranti, desolidarizzanti, etc..

Tutto questo processo va seguito partendo dalla fase di progettazione fino a quelle di realizzazione e di gestione. L'obiettivo deve essere quello di rispettare la legislazione vigente che, pur essendo a volte controversa, ha creato stimoli al settore delle costruzioni e ha sensibilizzato sugli aspetti qualitativi.

In questa sede si rimanda ad un testo specialistico di base per i riferimenti teorici qui solamente accennati, e si prosegue con un'indicazione alle disposizioni cogenti e fondamentali al progetto.

Nel rilevare le soluzioni per la bonifica acustica nell'ambito della riqualificazione prevista per il comparto F del Piano di Riqualificazione Urbana Pasubio, lo studio è stato effettuato in accordo alle prescrizioni della vigente legislazione e delle norme di buona tecnica, (Legge n. 447 del 26/10/1995 "Legge quadro sull'inquinamento acustico", D.P.C.M. 05/12/1997 "Determinazione dei Requisiti Acustici Passivi degli Edifici" che stabilisce una serie di prestazioni acustiche che devono essere obbligatoriamente rispettate, e le norme UNI).

In particolare per la valutazione dei requisiti acustici passivi si è fatto riferimento ai metodi semplificati riportati nel rapporto tecnico UNI/TR11175 (novembre 2005), che ha lo scopo di fornire le linee guida per l'applicazione delle norme UNI EN 12354 alle tipologie costruttive prevalenti in Italia.

4.2 RIFERIMENTI LEGISLATIVI

I principali riferimenti legislativi e normativi considerati per la redazione del presente documento sono i seguenti:

- Legge 26 ottobre 1995 n. 447 “Legge quadro sull'inquinamento acustico”;
- D.P.C.M. 5 dicembre 1997 “Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici”;
- UNI EN 12354 - 1 (novembre 2002) “Acustica in edilizia. Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti. Isolamento dal rumore per via aerea tra ambienti”;
- UNI EN 12354 - 2 (novembre 2002) “Acustica in edilizia. Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti. Isolamento acustico al calpestio tra ambienti”;
- UNI EN 12354 - 3 (novembre 2002) “Acustica in edilizia. Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti. Isolamento acustico contro il rumore proveniente dall'esterno per via aerea”;
- UNI/TR 11175 (novembre 2005) “Acustica in edilizia. Guida alle norme serie UNI EN 12354 per la previsione delle prestazioni acustiche degli edifici. Applicazioni alla tipologia costruttiva nazionale”.

La legge quadro sull'inquinamento acustico (n. 447/1995) stabilisce i principi fondamentali in materia di tutela dell'ambiente esterno e dell'ambiente abitativo dall'inquinamento acustico; all'articolo 3 “Competenze dello Stato”, punti e) ed f) la legge prevede l'emanazione di un decreto rispettivamente per la determinazione “dei requisiti acustici delle sorgenti sonore e dei requisiti acustici passivi degli edifici e dei loro componenti, allo scopo di ridurre l'esposizione umana al rumore”, e l'indicazione “dei criteri per la progettazione, l'esecuzione e la ristrutturazione delle costruzioni edilizie e delle infrastrutture dei trasporti, ai fini della tutela dall'inquinamento acustico”. In ottemperanza al punto e) è stato pubblicato il D.P.C.M. 5 dicembre 1997 “Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici”, mentre per quanto riguarda il secondo aspetto (relativo ai criteri di progettazione ed esecuzione delle costruzioni edilizie) il relativo decreto non è ancora stato emanato.

Ai fini dell'applicazione del D.P.C.M. 5 dicembre 1997, gli ambienti abitativi di cui all'art. 2, comma 1, lettera b) della Legge n. 447/1995, sono distinti in categorie; le destinazioni residenziali e assimilabili appartengono alla categoria A, le destinazioni commerciali alla categoria G.

Si sottolinea che gli ambienti abitativi di cui al D.P.C.M. 5 dicembre 1997 sono quelli definiti dalla legge 26 ottobre 1995 n. 447, dove per “ambiente abitativo” si intende “ogni ambiente interno ad un edificio destinato alla permanenza di persone o di comunità ed utilizzato per le diverse attività umane, fatta eccezione per gli ambienti destinati ad attività produttive per i quali resta ferma la disciplina di cui al D.Lgs. 15 agosto 1991, n. 277, salvo per quanto concerne l'immissione di rumore da sorgenti sonore esterne ai locali in cui si svolgono le attività produttive”.

4.3 D.P.C.M. 5 DICEMBRE 1997

Le grandezze di riferimento da considerare per la valutazione dei requisiti acustici passivi degli edifici, dei loro componenti e degli impianti tecnologici sono:

- **T**
tempo di riverberazione;
- **R'_w**
potere fonoisolante apparente di elementi di separazione fra ambienti; il decreto prevede il valore limite del suo indice di valutazione R'_{w} ;
- **D_{2m,nT}**
isolamento acustico standardizzato di facciata (normalizzato rispetto al tempo di riverberazione dell'ambiente ricevente); il decreto prevede il valore limite del suo Indice di valutazione ($D_{2m,nT,w}$);
- **L'_n**
livello di rumore di calpestio di solai normalizzato (rispetto all'area equivalente di assorbimento acustico); il decreto prevede il valore limite del suo Indice di valutazione ($L'_{n,w}$);
- **L_{ASmax}**
livello massimo di pressione sonora, ponderata A con costante di tempo slow (per valutare la rumorosità prodotta dagli impianti tecnologici a funzionamento discontinuo - quali gli ascensori, gli scarichi idraulici, i bagni, i servizi igienici e la rubinetteria -; le misure del livello sonoro devono essere eseguite nell'ambiente nel quale il livello di rumore è più elevato; tale ambiente deve essere diverso da quello in cui il rumore si origina);
- **L_{Aeq}**
livello continuo equivalente di pressione sonora, ponderata A (per valutare la rumorosità prodotta dagli impianti tecnologici a funzionamento continuo - quali gli impianti di riscaldamento, aerazione e condizionamento -; le misure del livello sonoro devono essere eseguite nell'ambiente nel quale il livello di rumore è più elevato; tale ambiente deve essere diverso da quello in cui il rumore si origina).

Le misure di livello sonoro devono essere eseguite nell'ambiente nel quale il livello di rumore è più elevato. Tale ambiente deve essere diverso da quello in cui il rumore si origina.

Categoria A: edifici adibiti a residenza o assimilabili
Categoria B: edifici adibiti ad uffici e assimilabili
Categoria C: edifici adibiti ad alberghi, pensioni ed attività assimilabili
Categoria D: edifici adibiti ad ospedali, cliniche, case di cura e assimilabili
Categoria E: edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili
Categoria F: edifici adibiti ad attività ricreative o di culto o assimilabili
Categoria G: edifici adibiti ad attività commerciali o assimilabili

Tab.4.1. - Classificazione degli ambienti abitativi (art. 2).

Categorie di cui alla Tab. 1	Parametri				
	R'_w (*)	$D_{2m,nT,w}$	$L'_{n,w}$	L_{ASmax}	L_{Aeq}
1. D	55	45	58	35	25
2. A, C	50	40	63	35	35
3. E	50	48	58	35	25
4. B, F, G	50	42	55	35	35

(*) Valori di R_w riferiti a elementi di separazione tra due distinte unità immobiliari

Tab.4.2 - Requisiti acustici passivi degli edifici, dei loro componenti e degli impianti tecnologici.

4.4 CALCOLI DI PROGETTO SECONDO LA UNI/TR 11175

Ove possibile i calcoli sono stati condotti secondo quanto previsto dalla sopracitata UNI/TR 11175. Come precisa tale documento, il metodo, che vuole avere validità generale, non considera discontinuità o mancanza di tenuta dei giunti (fessure, attraversamenti, ponti acustici); esso prevede la definizione di alcuni parametri, ovvero:

- indice di valutazione del potere fonoisolante R_w , che si ottiene, secondo la norma UNI EN ISO 717-1, dal potere fonoisolante R per bande di frequenza espresso da:

$$R = 10 \lg \frac{W_1}{W_2} \text{ [dB]}$$

con:

W_1 potenza incidente sull'elemento incidente,

W_2 potenza trasmessa dall'elemento di separazione;

- indice di valutazione del potere fonoisolante apparente R'_w dell'elemento di separazione tra due ambienti, che si ottiene, secondo la norma UNI EN ISO 717-1, dal potere fonoisolante apparente R' per bande di frequenza espresso da:

$$R' = 10 \lg \frac{W_1}{W_2 + W_3} \text{ [dB]}$$

con:

W_1 potenza incidente sull'elemento incidente,

W_2 potenza trasmessa dall'elemento di separazione,

W_3 potenza trasmessa dall'elemento di separazione attraverso elementi laterali o da altri componenti;

tale parametro può essere così calcolato:

$$R'_w = -10 \lg \left(10^{\frac{-R_{Dd,w}}{10}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{\frac{-R_{Ff,w}}{10}} + \sum_{f=1}^n 10^{\frac{-R_{Df,w}}{10}} + \sum_{F=1}^n 10^{\frac{-R_{Fd,w}}{10}} \right) \text{ [dB]}$$

(vengono considerati i coefficienti R_{ij} di trasmissione lungo i vari possibili percorsi -vedi figura seguente- ed anche i coefficienti di riduzione delle vibrazioni ai giunti)

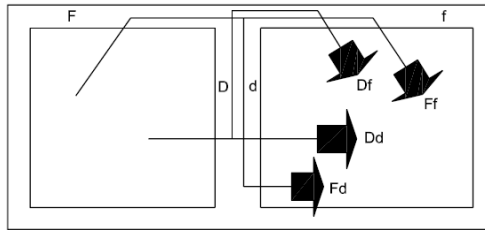


Fig. 4.1. – Vari percorsi di trasmissione tra ambienti confinanti.

- indice di valutazione dell'isolamento acustico normalizzato di piccoli elementi (con superficie inferiore a 1 m²) $D_{n,e,w}$:
grandezza in decibel che si ottiene in laboratorio secondo la norma UNI EN ISO 717-1 dall'isolamento acustico normalizzato dei piccoli elementi $D_{n,e}$ per bande di frequenza espresso da:

$$D_{n,e} = L_1 - L_2 - 10 \lg \frac{A}{A_0} \text{ [dB]}$$

dove:

L_1 è il livello medio di pressione sonora nell'ambiente emittente,

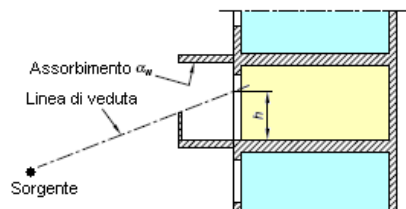
L_2 è il livello medio di pressione sonora nell'ambiente ricevente,

A è l'area di assorbimento equivalente nell'ambiente ricevente,

A_0 è l'area di assorbimento equivalente di riferimento per vani di appartamenti, assunta pari a 10 m²;

si fa osservare che un caso tipico di piccoli elementi è il foro di aerazione per la cucina;

- correzione per trasmissione laterale K :
assume valore nullo per elementi di facciata non connessi ed assume valore pari a 2 per elementi di facciata pesanti con giunti rigidi; in considerazione delle perdite di prestazione che si verificano con la messa in opera, nei calcoli che seguono si assumerà il valore di K pari a 2;
- fattore di forma, Δ_{fs} :
termine che valuta il contributo, negativo o positivo, della forma della facciata definito come
 $\Delta_{fs} = L_{1,2m} - L_{1,s} + 3 \text{ dB}$
dove:
 $L_{1,2m}$ è il livello medio di pressione sonora rilevato a 2 m dal piano della facciata,
 $L_{1,s}$ è il livello medio di pressione sonora rilevato, effetto di riflessione incluso, sulla superficie esterna della facciata;
la norma UNI propone un prospetto semplificato con cui valutare l'effetto della forma della facciata (definita attraverso la sezione verticale e gli schermi acustici presenti) in cui si tiene conto anche di:
- assorbimento acustico di pareti prospicienti sulla facciata, α_m ,
- altezza di veduta h (ovvero altezza definita dalla intersezione tra la linea di veduta dalla sorgente ed il piano della facciata);
la figura seguente illustra il significato dei parametri ed il prospetto successivo le tipologie di facciata:



(a)

	Facciata piana	Ballatoio ¹⁾			Ballatoio ¹⁾			Ballatoio ¹⁾			Ballatoio ¹⁾				
α_w	Non si applica	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$		
$h < 1,5 \text{ m}$	0	-1	-1	0	-1	-1	0	0	0	1	Non si applica				
$1,5 \leq h \leq 2,5 \text{ m}$	0	Non si applica			-1	0	2	0	1	3	Non si applica				
$h > 2,5 \text{ m}$	0	Non si applica			1	1	2	2	2	3	3	4	6		
	Balcone ²⁾	Balcone ²⁾			Balcone ²⁾			Terrazza							
								Schemature aperte			Schemature chiuse				
α_w	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$
$h < 1,5 \text{ m}$	-1	-1	0	0	0	1	1	1	2	2	1	1	3	3	3
$1,5 \leq h \leq 2,5 \text{ m}$	-1	1	3	0	2	4	1	1	2	3	4	5	5	6	7
$h > 2,5 \text{ m}$	1	2	3	2	3	4	1	1	2	4	4	5	6	6	7
1)	Ballatoio, terrazza continua.														
2)	Balcone, terrazza discontinua limitata lateralmente.														

(b)

Fig. 4.2. - Significato dei parametri (a), prospetto delle tipologie di facciata, (b).

- Indice di valutazione dell'isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione $D_{2m,n,T,w}$:
è il parametro di confronto con la normativa per la verifica del rispetto del requisito di facciata) che viene definito come:

$$D_{2m,nT} = R' + \Delta L_{fs} + 10 \lg \frac{V}{6T_0 S} \text{ [dB]}$$

con :

V il volume dell'ambiente interno alla facciata,

S la superficie della facciata vista dall'interno,

T_0 il tempo di riverberazione di riferimento per gli appartamenti, pari a 0.5 secondi,

R'_w così definito:

$$R'_w = -10 \lg \left[\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{S} 10^{\frac{-R_{w,i}}{10}} + \sum_{i=1}^n \frac{A_0}{S} 10^{\frac{-D_{n,e,wi}}{10}} \right] - K$$

con:

R'_{wi} l'indice di valutazione del potere fonoisolante dell'elemento (i) in dB

S_i l'area dell'elemento (i) in m^2

$D_{n,e,wi}$ l'indice di valutazione dell'isolamento acustico normalizzato rispetto all'assorbimento equivalente del "piccolo elemento" (i) in dB

A_0 l'area di assorbimento equivalente di riferimento, pari a $10 m^2$,

K la correzione relativa al contributo della trasmissione laterale (definita in precedenza);

- Indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato $L'_{n,w}$:

è una grandezza che considera oltre alla trasmissione diretta anche quella laterale e che si ottiene secondo la UNI EN ISO 717-2 dal livello di pressione sonora di calpestio normalizzato per bande di frequenza espresso da:

$$L'_n = L_i + 10 \log (A/A_0) \quad [\text{dB}]$$

con:

L_i il livello di pressione sonora di calpestio, in decibel, determinato quando il solaio sottoposto a prova è eccitato dal generatore di calpestio normalizzato,

A l'area di assorbimento equivalente dell'ambiente ricevente, in m^2 ,

A_0 l'area di assorbimento equivalente di riferimento, pari a $10 m^2$;

per il modello di calcolo semplificato (la cui applicazione è limitata agli ambienti sovrapposti ed ai pavimenti omogenei di uso comune) si ottiene dalla formula

$$L'_{n,w} = L_{n,w,eq} - \Delta L_w + K$$

con:

$L_{n,w,eq}$ l'indice di valutazione del livello equivalente di pressione sonora di calpestio normalizzato relativo al solaio nudo privo di rivestimento,

ΔL_w l'indice di valutazione dell'attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio del rivestimento,

K la correzione da apportare per tener conto della trasmissione laterale nelle strutture omogenee, valutata facendo riferimento alla tabella 4.3.

(Se una o più costruzioni laterali compatte sono provviste di strati supplementari - rivestimento della parete - aventi una frequenza di risonanza $f_0 < 125$ Hz, le masse superficiali degli elementi ricoperti non sono considerate nel calcolo del valore della massa media).

Massa per unità di area del solaio di separazione kg/m ²	Massa media per unità di area degli elementi laterali omogenei non ricoperti con rivestimenti supplementari kg/m ²								
	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	1	0	0	0	0	0	0	0	0
150	1	1	0	0	0	0	0	0	0
200	2	1	1	0	0	0	0	0	0
250	2	1	1	1	0	0	0	0	0
300	3	2	1	1	1	0	0	0	0
350	3	2	1	1	1	1	0	0	0
400	4	2	2	1	1	1	1	0	0
450	4	3	2	2	1	1	1	1	1
500	4	3	2	2	1	1	1	1	1
600	5	4	3	2	2	1	1	1	1
700	5	4	3	3	2	2	1	1	1
800	6	4	4	3	2	2	2	1	1
900	6	5	4	3	3	2	2	2	2

Tab.4.3. –Masse da considerare nella valutazione di K.

4.5 L'ABACO DELLE MURATURE

La scelta delle pareti tipo è stata dettata dalle caratteristiche geometriche della struttura dell'edificio presente nello stato di progetto e dalla destinazione d'uso degli ambienti interessati.

Si sottolinea sin da ora la necessità di una perfetta e attenta posa in opera dei materiali, soprattutto in considerazione dei molti punti critici, dovuti ai numerosi elementi costituenti la parete: muratura, elementi strutturali non interclusi tra le partizioni esterne, e costituenti talvolta lesene, serramenti vetrati, montanti dei serramenti e vincoli degli stessi alle pareti, punti di contatto serramento-muratura, ecc.

- I materiali indicati sono da intendere sostituibili da materiali con caratteristiche analoghe o superiori, previo avallo del progettista acustico che ne verifica la compatibilità di progetto. Tutti i materiali dovranno essere accompagnati da certificazione di laboratorio inerente le caratteristiche richieste.

4.6 ISOLAMENTO ACUSTICO DI FACCIATA

Le valutazioni di seguito riportate fanno riferimento a muri di facciata non interessati in alcun modo da 'buchi' o 'scassi'; allo stato attuale le tracce elettriche non sono definite e non possono quindi essere considerate. Per questi elementi che deteriorano le prestazioni acustiche delle pareti, dovranno essere seguite particolari indicazioni.

Per verificare il requisito di isolamento acustico di facciata viene analizzato l'indice di valutazione dell'isolamento acustico di facciata $D_{2m,nT,w}$ normalizzato rispetto al tempo di riverberazione, il cui limite (inferiore), per gli edifici residenziali, è pari a 40 dB mentre per gli edifici commerciali è pari a

42 dB.

Si ricorda che (paragrafo 4.2.4 della UNI/TR 11175) "l'accuratezza acustica delle previsioni del modello dipende da molti fattori quali: l'accuratezza acustica dei dati di ingresso, la corrispondenza della situazione reale con il modello, la conoscenza certa del tipo di elementi e delle giunzioni coinvolti e della geometria della situazione" e che "la principale esperienza nella applicazione del modello è derivata soprattutto da edifici i cui elementi strutturali di base sono o possono essere considerati omogenei (per esempio pareti di calcestruzzo, di mattoni, di blocchi). In tali situazioni la previsione con l'uso di indici di valutazione dà luogo a uno scarto tipo di circa 2 dB con tendenza a sovrastimare leggermente l'isolamento".

Inoltre, relativamente alle valutazioni si segnala che:

- è sempre considerato il termine di correzione K per il contributo della trasmissione laterale pari a 2, caratteristico di elementi di facciata pesanti con giunti rigidi (a favore di sicurezza);
- si fa riferimento ai valori di R_w degli elementi strutturali indicati dai certificati di laboratorio, e quindi gli elementi strutturali sono da intendersi come aventi le caratteristiche indicate nei certificati nonché privi di tracce, fori o scassi che ne deteriorino le prestazioni acustiche. Le valutazioni fanno riferimento a condizioni ottime di posa in opera a regola d'arte.

4.7 LIVELLO DI RUMORE DI CALPESTIO

Per verificare il requisito del rumore di calpestio viene analizzato l'indice di valutazione del livello di rumore di calpestio di solai normalizzato $L'_{n,w}$, il cui limite (superiore), per gli edifici residenziali, è pari a 63 dB e per gli edifici commerciali è pari a 55 dB.

Si ricorda che (paragrafo 4.2.4 della UNI/TR 11175) "l'accuratezza acustica delle previsioni del modello dipende da molti fattori quali: l'accuratezza acustica dei dati di ingresso, la corrispondenza della situazione reale con il modello, la conoscenza certa del tipo di elementi e delle giunzioni coinvolti e della geometria della situazione" e che "la principale esperienza nella applicazione del modello è derivata soprattutto da edifici i cui elementi strutturali di base sono o possono essere considerati omogenei (per esempio pareti di calcestruzzo, di mattoni, di blocchi). In tali situazioni la previsione con l'uso di indici di valutazione dà luogo a uno scarto tipo di circa 2 dB con tendenza a sovrastimare leggermente l'isolamento".

Inoltre, relativamente alle valutazioni si segnala in particolare che esse fanno riferimento a condizioni di prova ottimali con una posa in opera a regola d'arte in cui le strutture siano fra loro desolidarizzate. Si sottolinea pertanto la necessità di porre particolare attenzione sia alla posa in opera dei materiali sia alla scelta degli stessi, perché possano garantire le migliori prestazioni acustiche.

Il calcolo semplificato prevede l'utilizzo di alcuni parametri tra i quali, oltre al materiale interposto nel solaio con effetto anticalpestio, il peso delle pareti verticali che possono trasmettere vibrazioni; le pareti verticali dovrebbero essere costituite da materiale omogeneo.

4.8 ISOLAMENTO ACUSTICO FRA AMBIENTI

Per verificare il requisito di isolamento acustico fra ambienti viene analizzato l'indice del potere fonoisolante apparente di partizioni fra ambienti R'_w il cui limite (inferiore), per gli edifici residenziali e commerciali e con riferimento a unità immobiliari distinte, è pari a 50 dB(A).

Si ricorda che (paragrafo 4.2.4 della UNI/TR 11175) "l'accuratezza acustica delle previsioni del modello dipende da molti fattori quali: l'accuratezza acustica dei dati di ingresso, la corrispondenza della situazione reale con il modello, la conoscenza certa del tipo di elementi e delle giunzioni coinvolti e della geometria della situazione" e che "la principale esperienza nella applicazione del modello è derivata soprattutto da edifici i cui elementi strutturali di base sono o possono essere considerati omogenei (per esempio pareti di calcestruzzo, di mattoni, di blocchi). In tali situazioni la previsione con l'uso di indici di valutazione dà luogo a uno scarto tipo di circa 2 dB con tendenza a sovrastimare leggermente l'isolamento".

Inoltre, relativamente alle valutazioni si segnala che:

- si fa riferimento ai valori di R_w degli elementi strutturali indicati dai certificati di laboratorio (o secondo le ipotesi fatte nel capitolo 4.2.1 e 4.2.2), e quindi gli elementi strutturali sono da intendersi come aventi le caratteristiche indicate nei certificati nonchè privi di tracce, fori o scassi che ne deteriorino le prestazioni acustiche;
- si fa riferimento a condizioni ottimali di posa in opera a regola d'arte.

Tutte le valutazioni si basano sullo schema semplificato riportato nella figura seguente dove sono evidenziati il percorso diretto (blu) e quelli laterali (rosso e arancione).

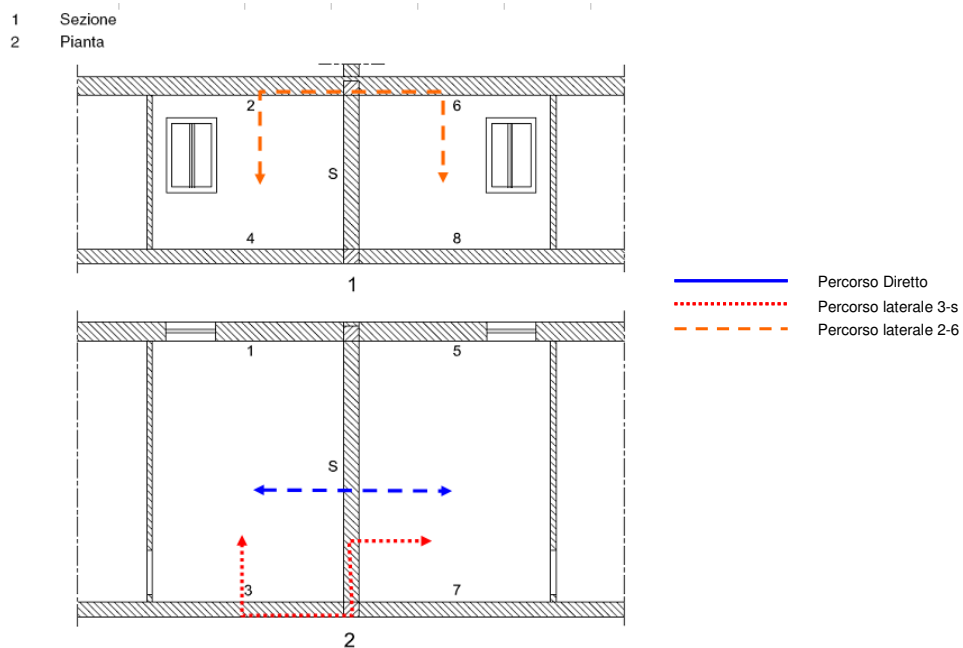


Fig. 4.3. - Schema semplificato dove sono evidenziati il percorso diretto (blu) e quelli laterali (rosso e arancione) tra ambienti comunicanti.

Non in tutti i casi in esame il modello risulta applicabile; sono quindi state effettuate delle ipotesi per

ricondere la geometria reale alle modalità di funzionamento del modello semplificato. In particolare il modello prevede che gli elementi verticali che costituiscono gli elementi di trasmissione abbiano caratteristiche omogenee; ciò non si verifica in generale in quanto il muro perimetrale ha massa di gran lunga maggiore rispetto le tramezze interne alle abitazioni.

5.1 INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO NELLA PIANIFICAZIONE URBANA

Si riporta di seguito l'estratto del programma definitivo di riqualificazione urbana (PRU) per l'area compresa tra via Pasubio e via Palermo del Comune di Parma, in cui si può notare l'area oggetto dell'intervento evidenziata con bordo rosso. Qui sotto, nel particolare all'interno della curva blu, l'oggetto di interesse della presente relazione.

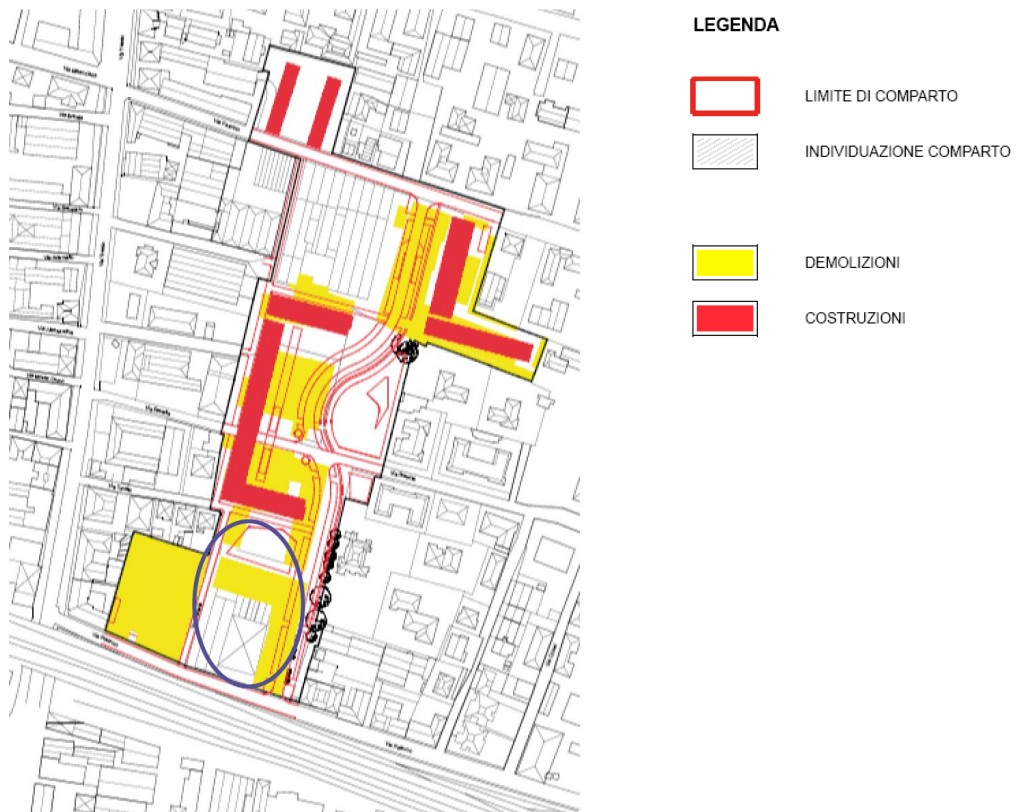


Fig. 5.1 – Estratto del PRU del comune di Parma per l'area in progetto.



Fig. 5.2 – L'area di progetto rispetto al tessuto urbano: collocazione nella città.

L'area è localizzata immediatamente a nord di via Palermo e della linea ferroviaria, ad est di via Trento, mentre la parte nord si attesta su via Pasubio.

Come si vede chiaramente dalle immagini, l'area è di notevoli dimensioni - all'incirca 3500 metri quadrati di superficie, e i lavori avrebbero dovuto iniziare la primavera 2009, ma attualmente sono ancora alle primissime fasi di costruzione.

All'origine del progetto essa comprendeva edifici di carattere produttivo, alcuni dei quali dismessi. Si tratta, infatti, di area di trasformazione soggetta a norma di tipo centro urbano, in cui pertanto si interviene attraverso un piano urbanistico attuativo.

Dal punto di vista urbanistico il progetto rientra nel PRU e si pone come scopo il miglioramento dell'accessibilità della zona attraverso la creazione di una strada che da via Pasubio si collega a via Palermo. I vuoti urbani creati dalla demolizione di fatiscanti edifici industriali vengono ricuciti dagli edifici residenziali. All'altezza di via Brescia si colloca una nuova piazza con ampio parcheggio sul lato opposto.

Dal punto di vista della funzionale, le aree di cessione dovranno dar corpo ad un sistema connesso di spazi pubblici in una zona caratterizzata da una forte concentrazione urbanistica, sono previste aree commerciali, culturali e soprattutto di carattere artistico e musicale.

Nell'ottica di inserire anche nuovi spazi musicali nella città di Parma, la scelta dell' area di progetto, a fianco della stazione ferroviaria a sud di via Pasubio – assicura continuità rispetto al circuito teatrale e musicale cittadino senza precludere la creazione di un sistema, il quale avrebbe una fondamentale importanza nell'ottica di un festival cittadino in grado di fornire un servizio completo ed efficiente.

L'obiettivo dell' intera opera é intervenire in modo non invasivo, ma cercando di valorizzare gli aspetti di pregio esistenti e di promuoverne lo sviluppo e le potenzialità.

Naturalmente in relazione all'area di interesse saranno garantiti il rispetto dei limiti previsti dalla normativa vigente in materia di impatto acustico ambientale. In esso l'edificio destinato ad attività di spettacolo deve essere progettato in maniera da assicurare un utilizzo a norma, secondo tutte le modalità d'uso previste.

5.2 DESCRIZIONE DELL' INSEDIAMENTO IN PROGETTO

All'interno dell'area, nella quale verranno creati il nuovo asse viario via Palermo – via Pasubio (elemento centrale dell'intervento), una nuova piazza urbana, un parco attrezzato ed un parcheggio pubblico (in superficie, lungo il nuovo viale, per la sosta temporanea e interrato su due livelli lungo il tracciato della strada di progetto). Sono inoltre previsti sei comparti edificatori denominati A, B, C, D, E ed F ovvero Casa della Cultura. Essi sono indicati nella planimetria descrittiva di progetto che segue.



Fig. 5.3 – Planimetria descrittiva dell'area di progetto.

L' edificio E costituisce l'ex SCEDEP , ovvero un area industriale creata nel 1919 con la costituzione della Società Cooperativa per l'Esportazione del Doppio Concentrato di Pomodoro. Lo spazio dello Scedep, pur trovandosi nel cuore della città, ne è sempre stato separato a causa della funzione industriale e della cesura spaziale della ferrovia. Grazie alla riqualificazione in atto, il particolare genius loci di quest'area, unico a Parma, è tornato a pulsare, inserendosi nello spazio vivo della città.

Un interesse particolare riveste il comparto F, oggetto della presente trattazione. L'edificio, in passato sede dello CSAC (Centro Studi Arte Contemporanea) è un manufatto di elevato pregio architettonico, caratterizzato dal padiglione Nervi, che verrà in parte conservato e riadattato a Casa

della Cultura, sede innovativa di spazi espositivi e didattici destinata a diventare un polo attrattivo fondamentale della città, in particolare per i giovani.

Nella tabella seguente si riporta una breve descrizione dei singoli comparti.

Comparto	Descrizione
A	Edificio a più piani che si affaccia su Via Palermo, ha una funzione prevalentemente direzionale, con servizi pubblici e privati.
B	Comparto che funge da collegamento tra l'ex CASA DELLA CULTURA e l'ex SCEDEP, ha una vocazione mista: commerciale di vicinato, piccola ristorazione, artigianato alimentare e pubblici servizi al piano terra, e residenziale agli altri piani.
C	Collocato su Via Brescia, ha prevalentemente funzione residenziale, con piccoli locali commerciali e servizi a piano terra e ammezzato.
D	Situato su Via Pasubio, è completamente residenziale ed ospita gli alloggi di Edilizia Residenziale Pubblica.
E - ex SCEDEP	Sito in Via Pasubio, sarà in parte restaurato, con l'obiettivo di valorizzarne le caratteristiche. Il nuovo quartiere avrà funzioni culturali, commerciali e di servizio.
F - ex CASA DELLA CULTURA	Manufatto di elevato pregio architettonico, in cui sorge il padiglione Nervi, è destinato ad essere riadattato come contenitore culturale innovativo, sede di spazi espositivi e didattici.

Tab. 5.1 – Descrizione dei singoli comparti in progetto.

5.3 INQUADRAMENTO NELLA ZONIZZAZIONE ACUSTICA COMUNALE

Con il termine di “classificazione acustica del territorio” (o zonizzazione) si intende indicare quella procedura che porta a differenziare il territorio in sei classi omogenee, (Fig. 5.4), sulla base dei principali usi urbanistici consentiti, siano essi già realizzati o soltanto in previsione; tale procedura è fortemente dipendente dai criteri che vengono assunti per l'individuazione delle classi e conseguentemente anche i risultati ottenuti possono essere disomogenei. Ad ogni classe omogenea individuata competono, sulla base delle indicazioni statali, specifici limiti acustici (DPCM 14/11/97 “Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore”).

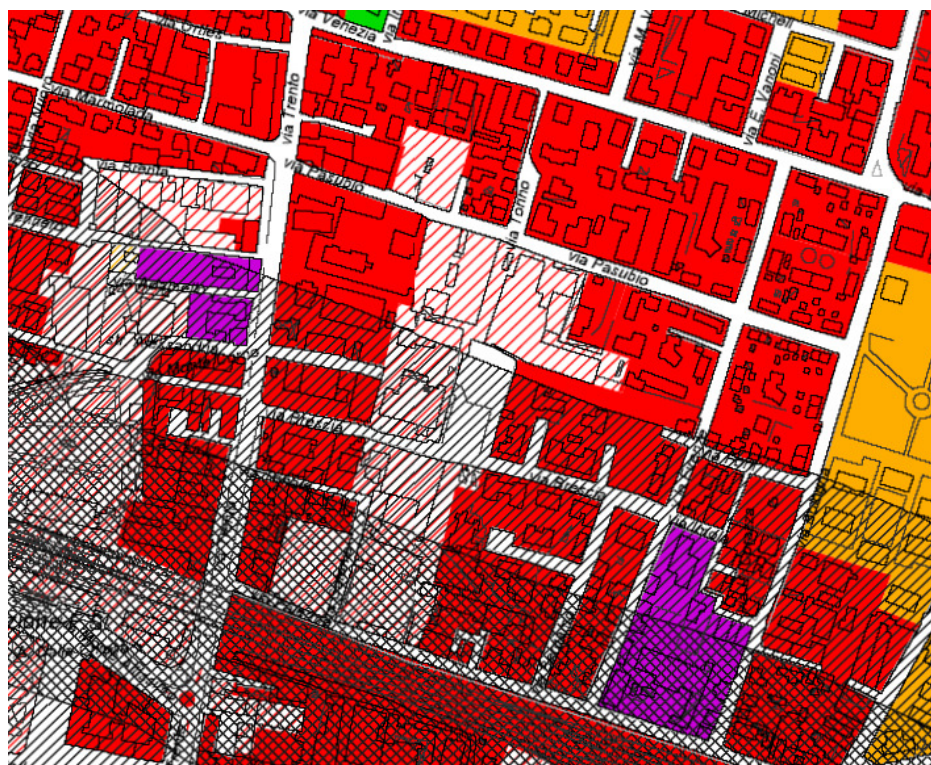
La zonizzazione acustica del comune di Parma inserisce l'area in esame completamente in classe IV, con limiti assoluti di immissione per i periodi diurno e notturno rispettivamente pari a 65 e 55 dB(A) e definita come:

- aree di intensa attività umana: rientrano in questa classe le aree urbane interessate da intenso traffico veicolare, con alta densità di popolazione, con elevata presenza di attività commerciali e uffici con presenza di attività artigianali; le aree in prossimità di strade di grande comunicazione e di linee ferroviarie; le aree portuali, le aree con limitata presenza di piccole industrie.

Inoltre, Il DPR 18/11/1998 n. 459 disciplina l'inquinamento acustico derivante dal traffico ferroviario. In base ad esso, buona parte dell'area in esame ricade all'interno delle fasce di pertinenza dell'infrastruttura ferroviaria con

- fascia A di ampiezza pari a 100 m, con limiti assoluti di immissione per i periodi diurno e notturno rispettivamente pari a 70 e 60 dB(A);
- fascia B di ampiezza pari a 150 m oltre la fascia A, con limiti assoluti di immissione per i periodi diurno e notturno rispettivamente pari a 65 e 55 dB(A);

si ricorda che, entro tali fasce, i limiti indicati si riferiscono al solo contributo di rumore dovuto alla ferrovia, mentre per le altre sorgenti di rumore valgono i limiti della classificazione acustica. Si riporta uno stralcio planimetrico della zonizzazione acustica del comune di Parma.



Legenda zonizzazione acustica:

Zone D.P.C.M. 01/03/1991

	Zona 1 - Aree particolarmente protette
	Zona 2 - Aree destinate ad uso residenziale
	Zona 3 - Aree di tipo misto
	Zona 4 - Aree di intensa attività umana
	Zona 5 - Aree prevalentemente industriali
	Zona 6 - Aree esclusivamente industriali

Limiti diurni
(06:00-22:00)

50 dBA	40 dBA
55 dBA	45 dBA
60 dBA	50 dBA
65 dBA	55 dBA
70 dBA	60 dBA
70 dBA	70 dBA

Limiti notturni
(22:00-06:00)

Zonizzazione acustica di progetto - Aree che attualmente non sono di questa zona ma che lo diventeranno in tempi brevi

	Zona 1 - Aree particolarmente protette
	Zona 2 - Aree destinate ad uso residenziale
	Zona 3 - Aree di tipo misto
	Zona 4 - Aree di intensa attività umana
	Zona 5 - Aree prevalentemente industriali
	Zona 6 - Aree esclusivamente industriali

50 dBA	40 dBA
55 dBA	45 dBA
60 dBA	50 dBA
65 dBA	55 dBA
70 dBA	60 dBA
70 dBA	70 dBA

Fasce di pertinenza infrastrutture ferroviarie (D.P.R. 18/11/1998 n° 459)

	Fascia A - larghezza di 100 m a partire dalla mezzzeria dei binari esterni per infrastrutture con velocità di progetto non superiore a 200 Km/h
	Fascia B - larghezza di 150 m a partire dal limite della Fascia A per infrastrutture con velocità di progetto non superiore a 200 Km/h e di 250 m a partire dalla mezzzeria dei binari esterni per infrastrutture con velocità di progetto superiore a 200 Km/h

Fig. 5.4 – Planimetria della zonizzazione acustica del comune di Parma.

5.4 CASA DELLA CULTURA – CRITERI E OBIETTIVI DI PROGETTO

Oggetto della seguente relazione é unicamente il comparto F denominato Casa della Cultura nell'ambito via Pasubio,.

La bonifica acustica del complesso é stata concepita sulla base dello stato attuale dell'area, degli intenti e delle possibilità costruttive di ristrutturazione e restauro. L'edificio denominato Casa della cultura, appartiene a quel filone architettonico dell'architettura industriale tipico degli anni '70 e molto presente in questa parte della città di Parma. Originariamente esso era costituito da quattro corpi di fabbrica: uno centrale sormontato da una grande cupola di particolare interesse ingegneristico-architettonico e gli altri tre addossati al corpo principale a Est, Nord e Ovest. Per permettere il passaggio della nuova viabilità prevista dal PRU Pasubio, il corpo ad Est è stato soggetto a demolizione, lasciando alla vista pareti e tamponamenti privi di alcun valore.



Fig. 5.5 - Stato di fatto della Casa della Cultura.

Oggetto della presente trattazione è l'unione del padiglione Nervi con il corpo ovest, che costituiranno il fulcro ricreativo ed artistico del progetto. Il corpo nord invece costituirà un collegamento al padiglione culturale : è un edificio orizzontale (nella foto) che ospiterà esercizi commerciali al piano terra e piccoli nuclei di uffici nelle quattro piante superiori, organizzati in moduli, in modo da poter essere ampliati in open space. Questo edificio sarà servito da un parcheggio sottostante articolato in tre livelli per un totale di circa 4.300 mq.

Il resto dell'edificio é composto da due capannoni industriali esistenti di cui si rispetta la struttura originaria. Uno di essi è costituito da una grande volta sostenuta da quattro pilastri d'angolo le cui teste sono collegate da travi, tutto in cemento armato, al di sotto della quale si costruirà un edificio

completamente nuovo. L'altro è composto da muri perimetrali in mattoni a faccia vista, con pilastri di calcestruzzo ed una copertura costituita da una volta cilindrica leggermente puntata, anch'essa in calcestruzzo e con interposizione di tiranti nella sezione trasversale. Essendo l'edificio sottoposto a vincolo di risanamento conservativo, il progetto si propone il mantenimento della cupola e della sua struttura, nonché il ripristino delle facciate originali degli altri due corpi di fabbrica.

L'impatto visivo della nuova "Casa della Cultura" sarà aperto, permeabile, flessibile a molteplici usi e attività; vari volumi si snoderanno sotto la copertura di un'immensa pensilina, costituita dalla cupola del Padiglione Nervi. Allo stato iniziale del progetto tutti gli organismi edilizi presentavano doppie altezze sproporzionate rispetto alla loro dimensione; nella proposta progettuale, in cambio, lo spazio è stato ottimizzato inserendo livelli intermedi che giocano con volumi e le luci libere, guadagnando, peraltro, metri quadrati in più di superficie.

Quanto alla distribuzione interna, essa si adegua e si plasma secondo un programma complesso che risponde a esigenze della committenza ben precise.

L'edificio ospiterà numerose attività legate al pubblico, tra cui laboratori, un auditorium, spazi teatrali al piano interrato al di sotto della cupola, grandi spazi aperti, terrazze e forme curve. Il progetto risolve la complessità della commistione di funzioni distinte tra loro, grazie ad un sapiente uso degli spazi distributivi che ne garantiscono l'assoluta indipendenza, mentre il sistema di accessi e di risalita permetterà alle diverse parti di entrare in relazione tra loro, come un unico grande organismo, oppure di funzionare separatamente.

Come già accennato, il padiglione culturale sarà servito da un nuovo parcheggio pubblico sotterraneo e da funzioni commerciali che si svilupperanno nel corpo più a nord del comparto.

Entrambi gli interventi s'inseriscono a completamento dell'operazione di complessiva riqualificazione - architettonica, urbanistica e sociale - che interessa l'area centrale compresa tra Via Palermo e Via Pasubio, riqualificazione messa in atto dalla Società di Trasformazione Urbana Pasubio e promossa dal Comune di Parma. L'obiettivo è che l'intera opera funga da motore di sviluppo e rilancio per un quartiere già periferico e oggi di fatto inserito nel cuore pulsante della città.

Di seguito alcune immagini descrittive dell'intervento.



Fig. 5.6. - Immagine descrittiva del progetto per il recupero dell'ex Padiglione Nervi.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5.7 – Immagini delle viste (a) ovest, (b) sud-est, (c) est e (d) sud della Casa della Cultura.

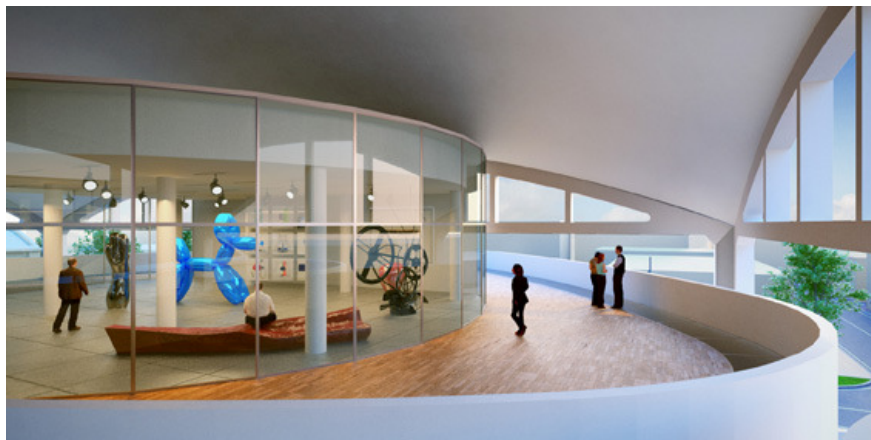
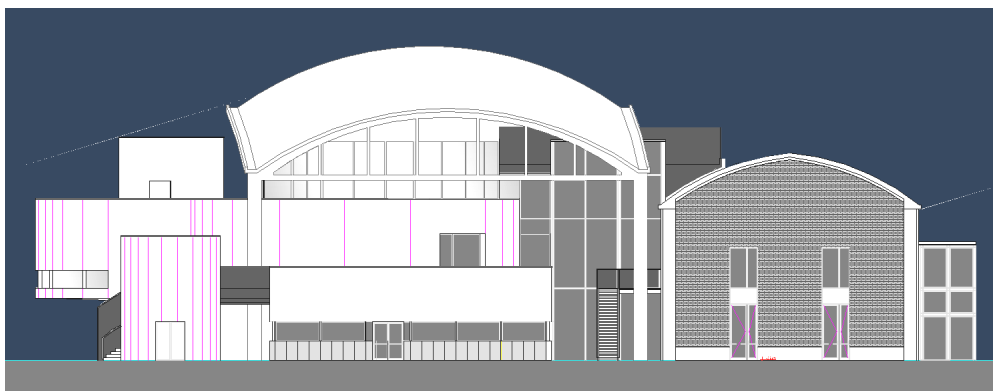


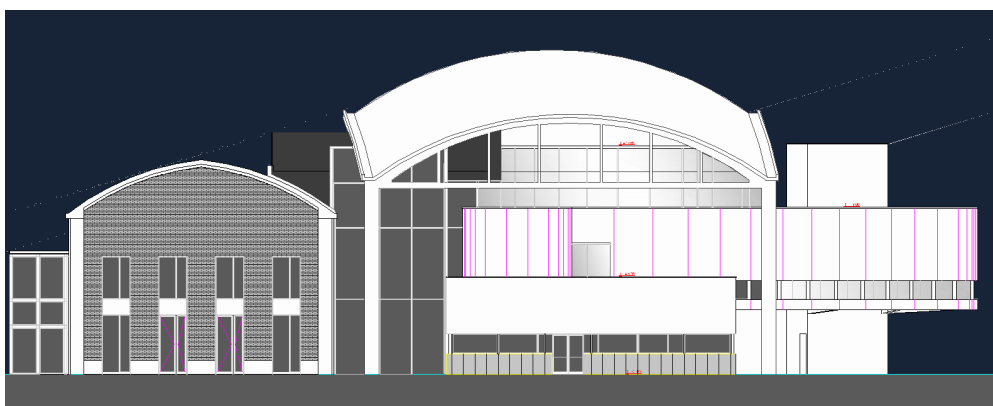
Fig. 5.8 – Immagine della sala espositiva al secondo livello della Casa della Cultura.

5.5 PROSPETTI E SEZIONI

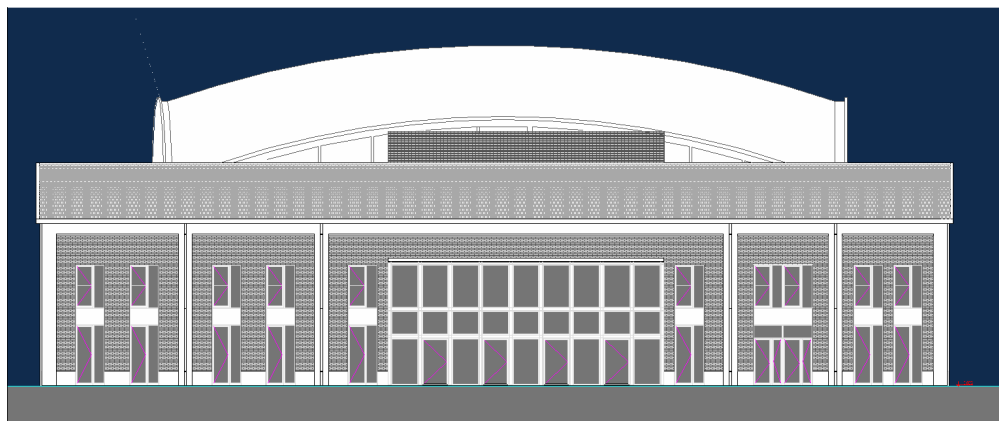
Verranno di seguito riportati alcuni prospetti e sezioni, elementi descrittivi del progetto.



PROSPETTO NORD



PROSPETTO SUD



PROSPETTO OVEST

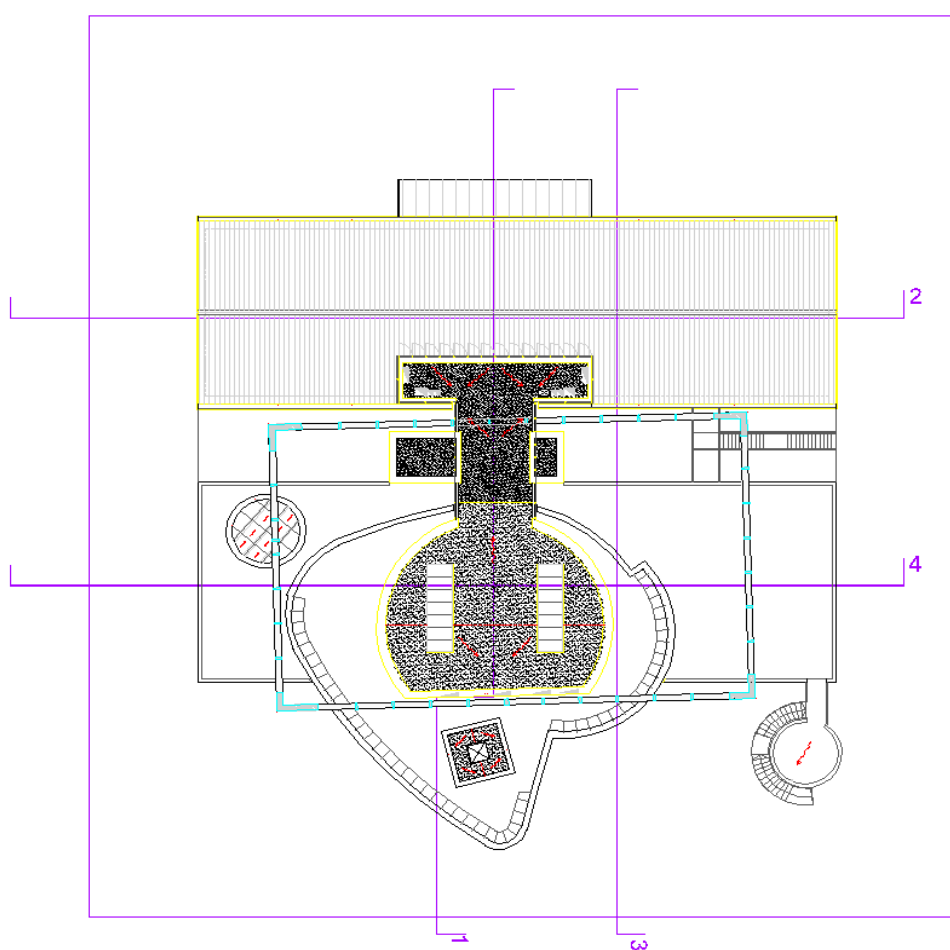
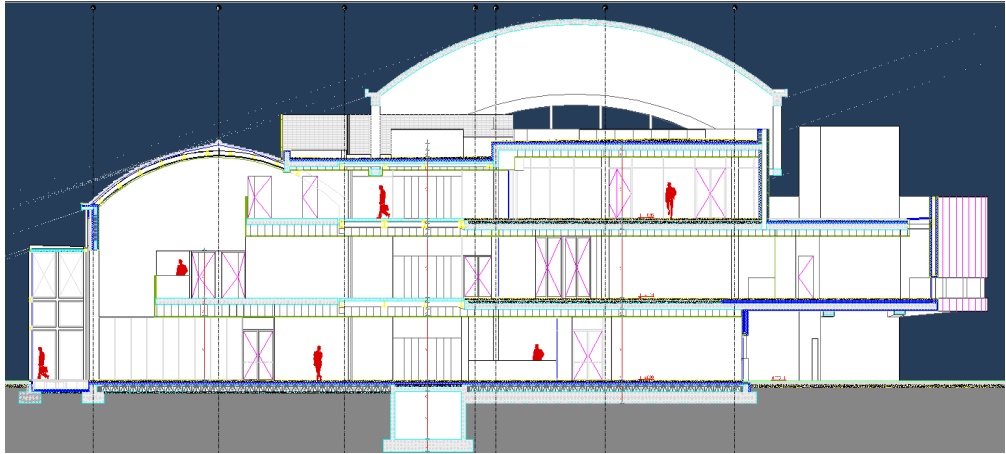
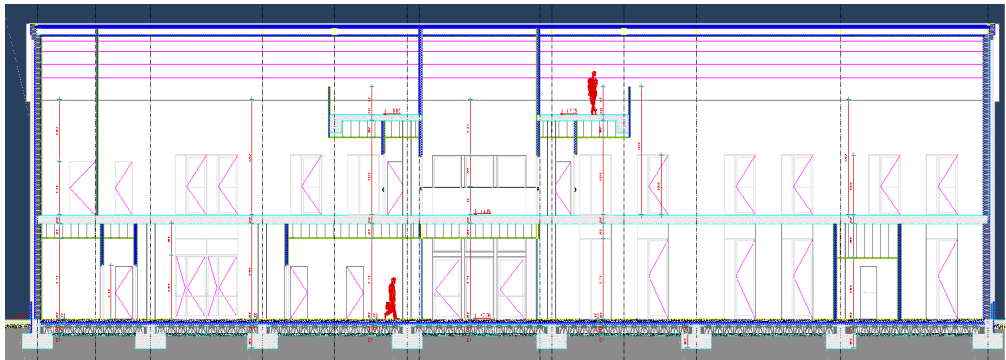


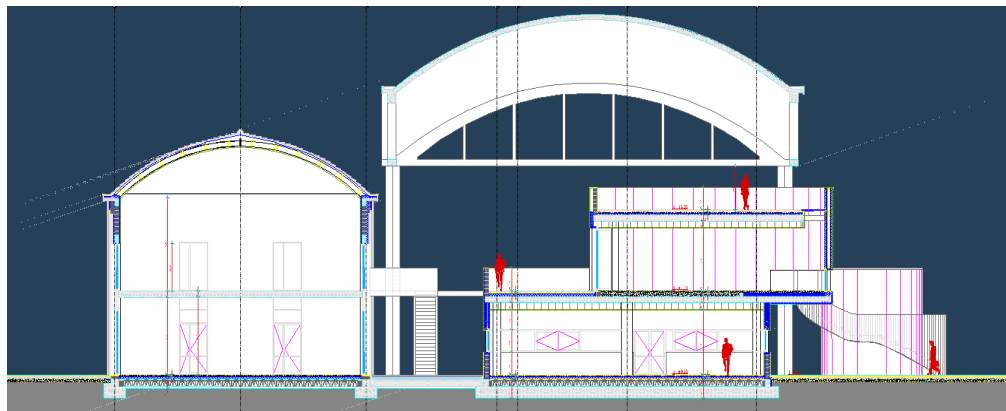
Fig. 5.9 – Pianta della Casa della Cultura con l'identificazione delle differenti sezioni.



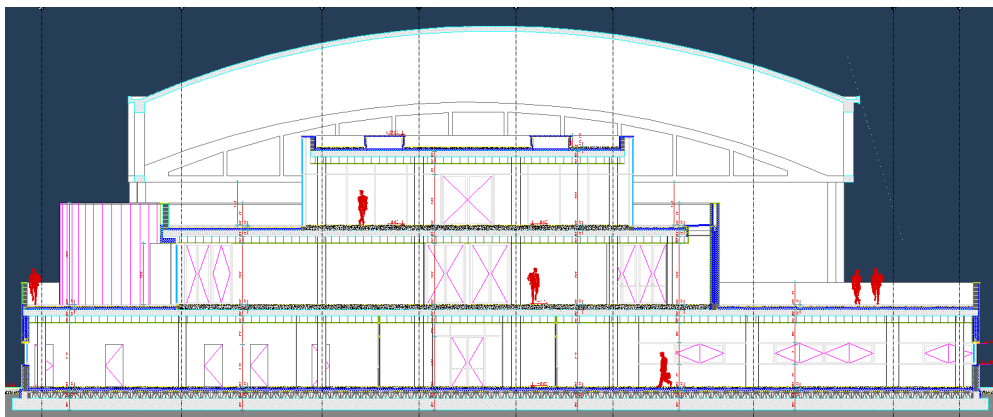
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5.10 – Immagini descrittive delle differenti sezioni dalla pianta della Casa della Cultura, rispettivamente sezione 1, 2, 3 e 4.

5.6 SCELTA DEGLI SPAZI INTERNI

L'approccio distributivo è cominciato con il determinare ciò di cui si avrebbe avuto bisogno: le funzioni di questo complesso dovevano assolvere a quelle dettate dalle necessità urbanistiche di una città, Parma, culturalmente ricettiva, oltre a quelle che avrebbero conferito all'area quella completezza necessaria ad esaltarne le caratteristiche e lo spirito.

L'idea di inserire in progetto un nuovo teatro e una sala polifunzionale moderni, denominati Lenz e Auditorium, nasce dalla necessità di rinnovare l'attuale offerta architettonica culturale e musicale in Parma: vedremo come, dal confronto con le sale esistenti a Parma, nasce la necessità di creare spazi più piccoli, facilmente accessibili, innovativi, in cui si concentrano differenti servizi e funzioni, adatti a un pubblico dinamico e ricettivo.

Oltre alle sale di uso musicale e scenico, tutte quelle funzioni accessorie che generassero servizi complementari, vale a dire gli spazi tecnici e ricreativi per qualsiasi fruitore dell'area, dallo spettatore agli attori ai tecnici. Regie, sala prove, camerini sono i principali spazi richiesti.

Perché la contestualizzazione risultasse efficace ed il complesso progettato potesse interfacciarsi con la città si è scelto di aggiungere altri spazi funzionali, in particolare si è deciso di creare spazi espositivi e laboratori audiovisivi e fotografici, con l'obiettivo di creare un'area unica in cui convergessero la prospettiva artistica e culturale urbana.

Sono inoltre stati previsti spazi comuni, compreso un luogo di ristoro o caffè. Infatti a completamento del servizio offerto all'utenza del complesso, si rendeva poi necessaria una struttura ricettiva che svolgesse compiti ristorativi in grado così di offrire una permanenza gradevole.

Un nuovo centro polifunzionale quindi in cui si incontrano cultura, arte e musica offrendo più servizi contemporaneamente.

5.6.1 SCHEMI FUNZIONALI E DI SUPERIFICI

Per quanto riguarda gli usi e le destinazioni, l'intervento è stato suddiviso in 9 zone, oltre agli spazi in comune e a quelli esterni.

La pianta a livello terra comprende :

- 1 caffè degli artisti
- 2 teatro Lenz
- 3 atelier arte contemporanea – spazio espositivo temporaneo
- 4 laboratorio audiovisivi – laboratorio fotografico.

La pianta a primo livello comprende :

- 5 Auditorium
- 6 sala Lenz
- 7 sala espositiva.

La pianta a secondo livello comprende :

- 8 sala espositiva
- 9 regia Auditorium e regia Lenz

Il caffè degli artisti costituisce uno spazio di ristoro.

Il teatro Lenz è l'edificio sede del teatro d'avanguardia e di eventi culturali.

Atelier arte contemporanea è uno spazio espositivo temporaneo che comprende il laboratorio audiovisivi e il laboratorio fotografico. I laboratori occupano il piano terra della Casa della cultura. Questi spazi potranno essere utilizzati dall'intero comparto per incontri quando il numero di persone coinvolte non richieda l'utilizzo dell'auditorium; la sua funzione principale sarà comunque quella di verifica e presentazione degli audiovisivi (con impianto di audio - video e proiezione adeguato); potrà essere utilizzata anche come *show room* temporaneo per la presentazione di portfolio fotografici.

Il laboratorio di fotografia comprende:

- sala ripresa fotografica
- laboratorio fotografico
- workstations per l'elaborazione e l'archiviazione digitale delle immagini.
- camera oscura
- locali per stampa digitale
- locale tecnico (sala server)

Il laboratorio di audiovisivi comprende:

- sala ripresa audio (per la registrazione del commento vocale agli audiovisivi)
- sala regia audio (per la registrazione del commento vocale agli audiovisivi)
- 2 sale montaggio audio-video
- locale tecnico (sala server)

Inoltre la sala espositiva al piano secondo della Casa della cultura è dedicata a mostre di fotografia ed audiovisivi. Può essere utilizzata come sala riunione e di presentazione delle opere al gruppo di lavoro.

L' Auditorium al primo piano è inteso come uno spazio adibito per eventi musicali, culturali, teatrali audiovisivi ed in genere eventi di spettacolo.

L'obiettivo dell'intero intervento è infatti proporre polo di attrazione urbano, un luogo utilizzato dalla cittadinanza nel maggior numero di occasioni possibili. Da un centro culturale di eccellenza per la

musica, situato in una posizione privilegiata immediatamente adiacente al centro urbano, si richiedeva di svolgere anche funzioni complementari a quelle già esistenti in una città come Parma, con un substrato culturale intriso di musica.

Nell'ottica quindi di ottimizzare lo spazio a disposizione, la struttura vuole quindi assicurare differenti destinazioni d'uso, per ognuna delle quali sarà necessario analizzare e assicurare l'acustica adeguata.

L' auditorium è stato dunque pensato per poter essere usufruito come :

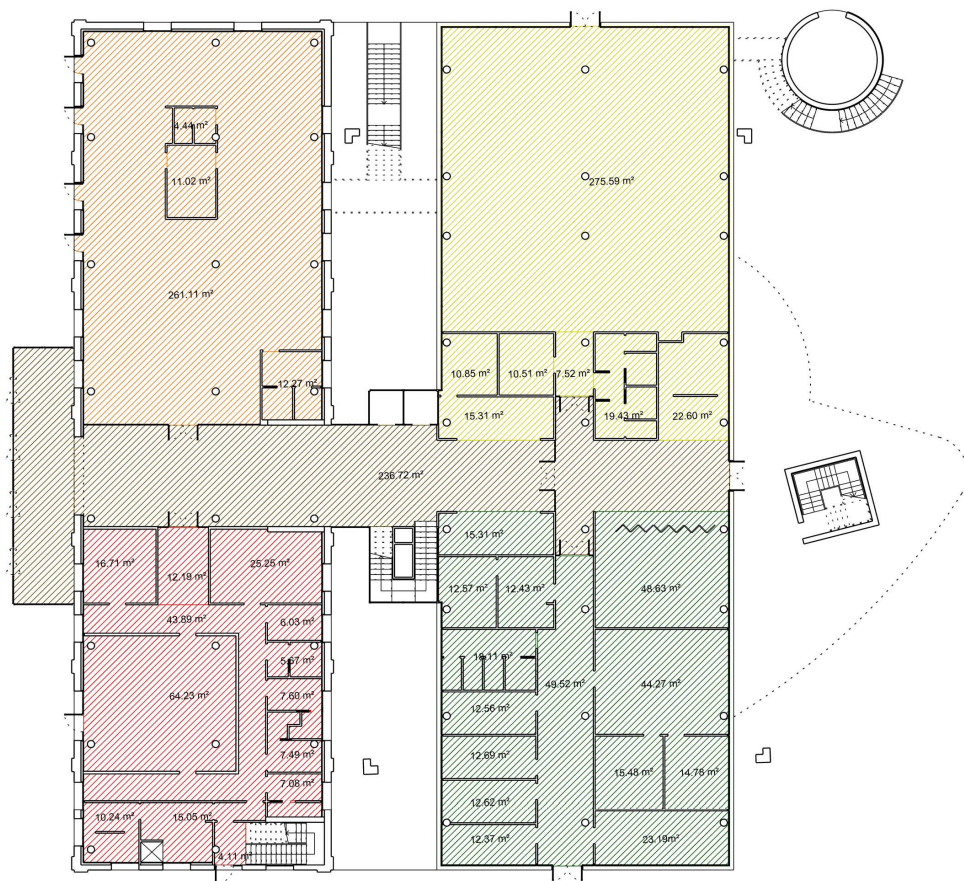
- sala registrazione
- concerti
- laboratori di acustica
- spettacoli teatrali , culturali e musicali in genere (vedi teatro Lenz)
- cinema
- sala di ripresa per set fotografici o di produzione audiovisiva
- sala di riproduzione ed ascolto per audiovisivi e composizioni musicali
- conferenze

Data la varietà delle destinazioni d'uso, sin dal principio è stato chiaro che tale spazio doveva essere di carattere innovativo per poter garantire un' ascolto adeguato nelle diverse condizioni di utilizzo.

Vedremo come la soluzione proposta contempli la presenza di strutture modulari di forma triangolare sulla superficie delle pareti la cui struttura prevedrà materiali di diverse proprietà acustiche da intercambiare in base all'utilizzo prescelto della sala.

Inoltre particolari palchi a comparsa permetteranno l'esercizio dei musicisti ad un'altezza sopraelevata rispetto il pavimento.

Nelle immagini che seguono gli schemi funzionali dei vari livelli.



PIANO TERRA - Superfici utili

TEATRO LENZ

Ingresso biglietteria	12,19 m²
Ufficio	16,71 m²
Sala riunioni/sala conferenza stampa	25,25 m²
Direzione	6,03 m²
Laboratorio teatrale	64,23 m²
Sartoria/stireria	10,24 m²
Laboratorio illuminotecnico-scenotecnico	15,05 m²
Ingresso secondario	4,11 m²
Camerino 1	7,08 m²
Camerino 2	7,49 m²
Camerino 3	7,60 m²
Servizi	5,67 m²
Spazi distributivi	43,89 m²
TOTALE	225,56 m²

CAFFÉ DEGLI ARTISTI

Sala ristoro polivalente	261,11 m²
Cucina	11,02 m²
Deposito	4,44 m²
Servizi	12,27 m²
TOTALE	288,84 m²

SPAZIO ESPOSITIVO TEMPORANEO

Reception	15,31 m²
Guardaroba	22,60 m²
Sala espositiva	275,59 m²
Deposito	21,36 m²
Disimpegno	7,52 m²
Servizi	19,43 m²
TOTALE	361,81 m²

LABORATORIO FOTOGRAFICO-AUDIOVISIVO

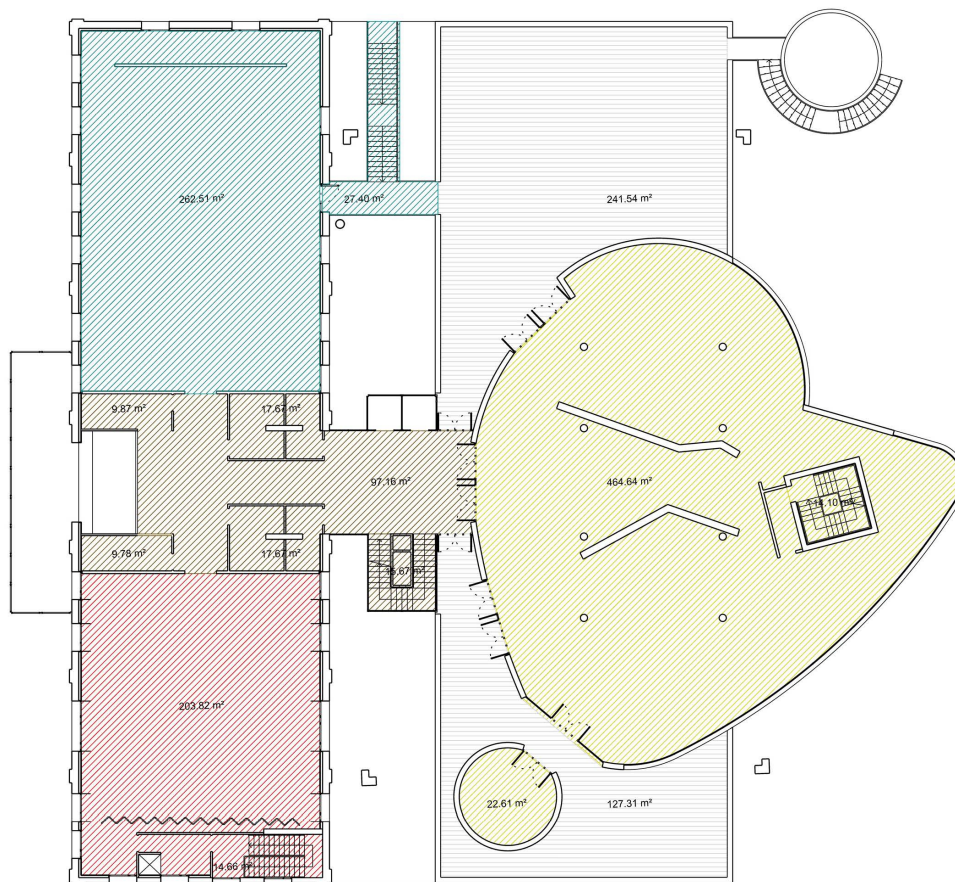
Reception	15,31 m²
Direzione	12,57 m²
Segreteria	12,43 m²
Sala ripresa fotografica	48,63 m²
Aula didattica	44,27 m²
Camera oscura	15,48 m²
Sala stampa digitale	14,78 m²
Locale tecnico	23,19 m²
Sala montaggio 1	12,37 m²
Sala montaggio 2	12,62 m²
Sala ripresa audio	12,69 m²
Sala regia audio	12,56 m²
Spazi distributivi	49,52 m²
Servizi	18,11 m²
TOTALE	304,60 m²

SPAZI COMUNI

Hall e disimpegni	236,72 m²
TOTALE	236,72 m²

PT_TOTALE SUPERFICIE UTILE	1417,53 m²
PT_TOTALE SUPERFICIE COSTRUITA	1621,71 m²

(a)



PIANO PRIMO - Superfici utili

TEATRO LENZ

Sala teatrale	203,82 m²
Scala di sicurezza	14,66 m²
TOTALE	218,48 m²

AUDITORIUM

Sala polivalente (160 posti)	262,51 m²
Scala di sicurezza	27,40 m²
TOTALE	289,91 m²

SPAZIO ESPOSITIVO

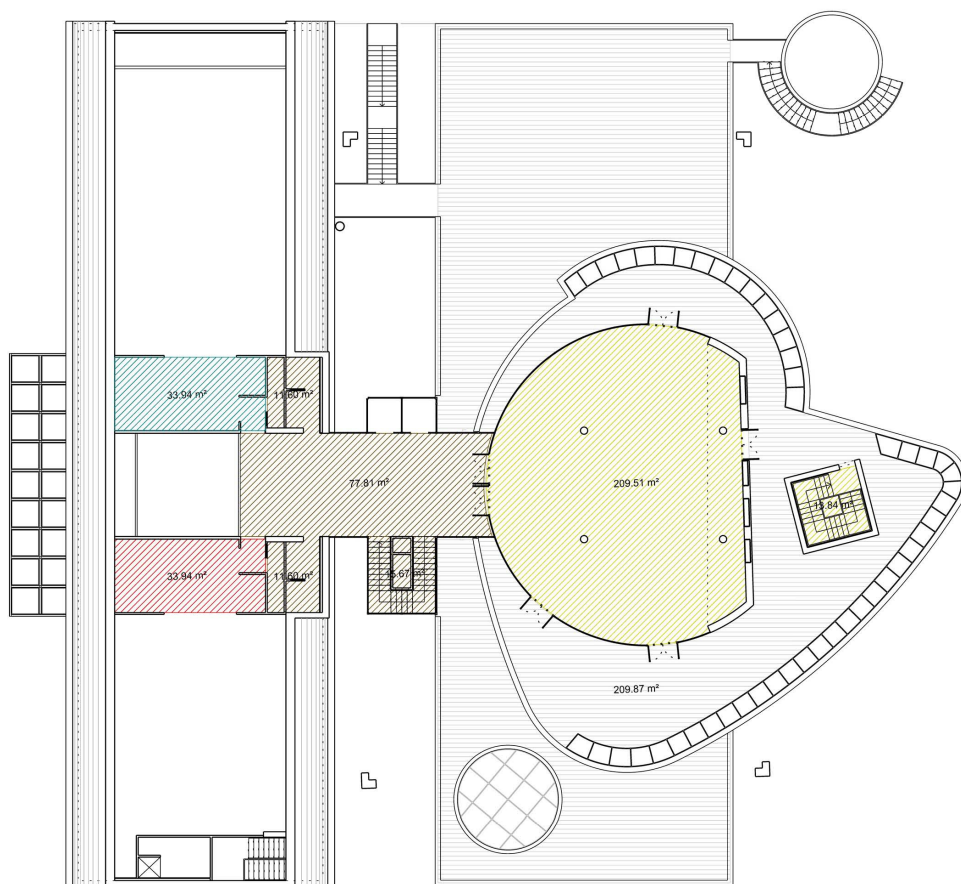
Sala espositiva	487,25 m²
Scala di sicurezza	14,10 m²
TOTALE	501,35 m²

SPAZI COMUNI

Hall e disimpegni	97,16 m²
Biglietteria	9,87 m²
Guardaroba	9,78 m²
Servizi (2 blocchi)	35,34 m²
Scala di accesso	15,67 m²
TOTALE	167,82 m²

P1_TOTALE SUPERFICIE UTILE	117,56 m²
P1_TOTALE SUPERFICIE COSTRUITA	1355,19 m²
P1_TERRAZZE	368,85 m²

(b)



PIANO SECONDO - Superfici utili

TEATRO LENZ

Regia/deposito	33,94 m²
TOTALE	33,94 m²

AUDITORIUM

Regia	33,94 m²
TOTALE	33,94 m²

SPAZIO ESPOSITIVO

Sala espositiva	209,51 m²
Sala di sicurezza	13,84 m²
TOTALE	223,35 m²

SPAZI COMUNI

Hall e disimpegni	77,81 m²
Servizi (2 blocchi)	23,20 m²
Sala di accesso	15,67 m²
TOTALE	116,68 m²

P2_TOTALE SUPERFICIE UTILE	407,91 m²
P2_TOTALE SUPERFICIE COSTRUITA	490,73 m²
P2_TERRAZZE	209,87 m²

SUPERFICIE UTILE	
QUADRO RIASSUNTIVO	
TEATRO LENZ	478,32 m ²
CAFFÉ LETTERARIO	288,84 m ²
AUDITORIUM	323,85 m ²
LAB. FOTOGRAFICO-AUDIOVISIVO	304,60 m ²
SPAZI ESPOSITIVI	1086,51 m ²
SPAZI COMUNI	521,22 m ²
TOTALE CSAC PUBBLICO	3003,34 m ²
TOTALE CSAC TERRAZZE	578,72 m ²

SUPERFICIE COSTRUITA	
QUADRO RIASSUNTIVO	
PIANO TERRA	1621,71 m ²
PIANO PRIMO	1355,19 m ²
PIANO SECONDO	490,73 m ²
TOTALE CSAC PUBBLICO	3467,63 m ²

(c)

Fig. 5.11. – Distribuzione degli spazi interni nel piano terra (a), primo livello (b) e secondo livello e quadro riassuntivo (c) della Casa della cultura.

5.7 CARATTERIZZAZIONE DELLO STATO DI FATTO

È stata eseguita un'analisi del clima acustico della zona, con lo scopo di verificare qual è il rumore presente e le sorgenti che maggiormente influiscono. Lo scopo era quello di verificare la compatibilità del clima acustico presente con la destinazione d'uso che abbiamo attribuito al progetto, e correggere le eventuali problematiche emerse dallo studio.

L'unico punto critico che si è la ferrovia, alla quale il comparto denominato Casa della Cultura nell'ambito via Pasubio, si affaccia come mostrato nella seguente immagine aerea.



Fig 5.12. - Vista aerea della Casa della Cultura

La vicina linea ferroviaria è la fonte principale del rumore presente nell'area perché, a differenza delle strade circostanti per cui alberi e fabbricati fungono involontariamente da barriere acustiche, non ha schermi naturali o artificiali di alcun genere.

Si è così ipotizzata l'installazione di uno schermo antirumore continuo lungo il lato che affianca l'edificio, tuttora in progetto. Questo intervento sarebbe sufficiente per ottenere nell'area di progetto un notevole miglioramento del clima acustico, idoneo ad ospitare le attività previste. Tale barriera è già stata progettata dalle Ferrovie dello Stato, ma non ancora realizzata.

Inoltre le immagini seguenti mostrano lo stato dei luoghi durante i rilievi, rispettivamente l'esterno e l'interno della struttura considerata.



Fig.5.13. – Stato di fatto dell'interno dell'edificio ovest del comparto F.



Fig 5.14. – Stato di fatto dell'interno del padiglione Nervi.

5.7.1 RILIEVI FONOMETRICI

Nel periodo 5 -15 febbraio 2010 sono state eseguite misure fonometriche finalizzate a caratterizzare la risposta acustica dell'ambiente, nello stato in cui si trovava. In particolare in relazione al comparto Casa della cultura, è stata eseguita una postazione di misura settimanale. La codifica qui adottata per tale rilievo sarà 2s, misura localizzata in via Palermo. Tale misura, posta a quota pari a 5 m di altezza, ha lo scopo di rilevare principalmente il contributo di rumore indotto dalla ferrovia, per ottenere una corretta taratura del modello di calcolo.

Per la misura è stata utilizzata una stazione fissa composta da un fonometro integratore Larson Davis 824 e da un microfono esterno (Larson Davis da 1/2"), munito di cuffia antivento – antipioggia. Prima e dopo le operazioni di misura si è proceduto al controllo della calibrazione della catena di misura sopra descritta con un calibratore Larson Davis CAL200. L'attrezzatura è in possesso dei requisiti richiesti dal D.M. 16 marzo 1998.

I certificati di taratura della strumentazione sono riportati in Allegato A.

Di seguito si riportano gli schematici riassuntivi della misurazione, maggiori dettagli nell'Allegato B dove sono raccolte le schede di dettaglio del suddetto rilievo fonometrico.



UBICAZIONE PUNTO	COORDINATE UTM			
Via Palermo – Parma	X: 0605314	y: 4962668	± 5	[m]

MICROFONO		
Altezza da terra	5.0	[m]
Distanza bordo strada – ferrovia	2.0 – 15.0	[m]
Distanza da superficie riflettente	3.0	[m]

TIPOLOGIA DELLA SORGENTE DI RUMORE					
☒ strada	☒ ferrovia	☐ fissa prod.	☐ fissa comm.	☐ fissa ricreativa	☐ altro:
Denominazione: via Palermo – linea ferroviaria					

LIMITI DI ZONIZZAZIONE ACUSTICA		
$L_{eq} D$	65.0	[dB(A)]
$L_{eq} N$	55.0	[dB(A)]

Tab. 5.2 – Dettagli del rilievo fonometrico, ubicazione e dati.

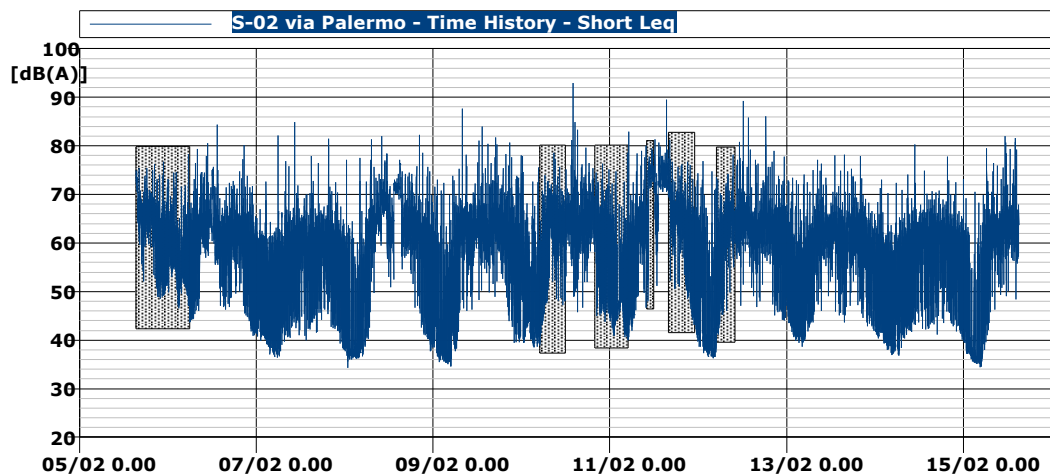
Ai fini della valutazione del clima acustico dello stato ante-operam (febbraio 2010) si rimanda all'allegato B i risultati del L_{eq} rilevato; tali valori sono stati inoltre utilizzati per la verifica della taratura del modello matematico impiegato per il calcolo della mappatura acustica dello stato di fatto e dello stato di progetto.

La seguente tabella mostra i valori di L_{eq} [dB(A)] rilevato (estratti dalla media settimanale).

Misura (postazione 2s)	L_{eq} [dB(A)] D (06-22)	L_{eq} [dB(A)] N (22-06)
Media settimanale	67.8	60.9

Tab. 5.3 – Valori di L_{eq} [dB(A)] rilevato estratti dalla media settimanale.

La misura Settimanale 2s (che rileva essenzialmente il rumore ferroviario) mostra come nel periodo notturno non sia rispettato il limite di 60 dB(A) nella fascia dei 100 metri dalla ferrovia.



NOTE
x mascheratura completa del periodo causa pioggia
o mascheratura parziale del periodo causa pioggia
* periodo incompleto
- non disponibile

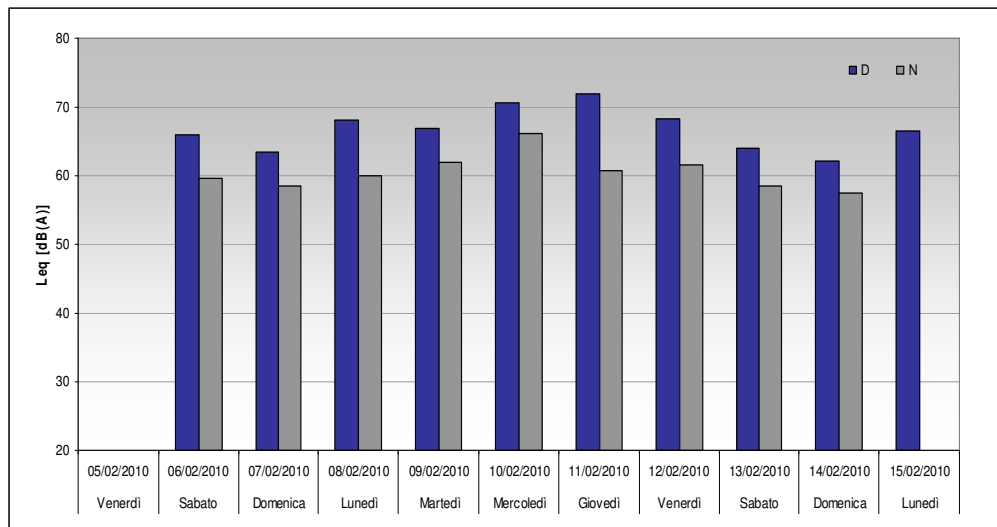


Fig.5.15 - L_{eq} [dB(A)] rilevato (estratti dalla media settimanale).

Naturalmente una campagna di misure sullo stato al grezzo, rilievi interni all'edificio, non risulterebbe significativa ai fini della progettazione acustica dell'edificio, né per una caratterizzazione formale, né possono essere utilizzati come elemento di partenza per effettuare la taratura del software di simulazione acustica, sulla base di un modello corrispondente allo stato di fatto.

Tale stato infatti non corrisponde al risultato finale, a causa della completa ristrutturazione interna del comparto in progetto.

5.7.2 IMPATTO ACUSTICO

L'edificio F è tra quelli maggiormente esposti al rumore ferroviario e sul lato di via Palermo si osserva come i livelli di esposizione al rumore superino i limiti previsti nella fascia di rispetto dei 100 m. Tuttavia, è opportuno fare le seguenti considerazioni:

- l'intero comparto F verrà impiegato per eventi di carattere artistico, musicale e culturale, quindi in nessun caso la destinazione d'uso di tali comparti sarà residenziale. In ogni caso sono previsti interventi di bonifica acustica adeguati per permettere un ascolto ottimo nelle sale in oggetto. Infatti considerata la vicinanza alla linea ferroviaria e visti i livelli che essa può provocare sulla facciata più esposta si ritiene che per il normale utilizzo della struttura l'involucro esterno dovrà abbattere almeno 50 dB. I pacchetti murari proposti sono stati calcolati per soddisfare tale requisito. Tuttavia il punto debole dell'involucro esterno sarà rappresentato dagli infissi che in questo progetto sono anche di notevoli dimensioni. Gli infissi scelti dal progettista architettonico possono ospitare un vetro dalle buone caratteristiche acustiche. In fase di realizzazione è importante verificare che le caratteristiche del serramento scelto e la sua corretta posa in opera non diminuiscano il valore d'isolamento proprio delle pareti.
- sono già previsti interventi di bonifica lungo la linea ferroviaria, mediante l'adozione di barriere antirumore, (in progetto dalle Ferrovie dello Stato).

5.7.3 CONSIDERAZIONI SULLO STATO DI FATTO NELLA PROGETTAZIONE ACUSTICA

Il progetto acustico dell'intero comparto, in particolare dell'Auditorium e del teatro Lenz, non ha potuto prescindere dallo stato di fatto in cui si trova l'edificio oltre che dagli intenti costruttivi. Infatti, nonostante si tratti di una costruzione ex novo, lo scopo, nel caso di queste due sale, è la ripresa delle forme originarie, limite per la loro progettazione acustica, poiché in genere non propriamente ottime per l'ubicazione di sale adibite a spettacolo.

A parte l'introduzione di livelli intermedi per ovviare all'eccessiva distribuzione in altezza dell'edificio in essere, lo stato attuale della struttura rivela un'ampia copertura a cupola, denominata Nervi, sede di echi e riverberi, essendo racchiusa dai tamponamenti. La riqualificazione acustica dovrà necessariamente riguardare la bonifica del soffitto che dovrà contare su un rivestimento fonoassorbente, oltre al trattamento ottimale delle pareti di fondo e laterali dell'edificio ovest, attualmente di calcestruzzo.

Per quanto riguarda il corpo ovest, nonostante la ripresa delle forme esterne, la nuova costruzione prevede una distribuzione dello spazio del tutto nuova, contemplando l'introduzione di piani e suddivisioni, oltre a nuovi materiali.

In genere una campagna di misure nello stato di fatto, con la sala al grezzo, può fornire dati interessanti. Dalla risposta all'impulso di un ambiente si possono calcolare tutti i parametri acustici oggettivi e dal suo andamento nel tempo si possono evidenziare eventuali anomalie come echi e riverberi. Tuttavia nell'ottica di contemplare una distribuzione degli spazi interni totalmente nuova, una campagna di misure nello stato di fatto non risulterebbe significativa.

Quindi in particolare per la cupola Nervi, nella progettazione acustica bisogna prestare attenzione al fenomeno dell'eco allo stato di progetto; esso potrebbe, infatti, manifestarsi, seppur in misura inferiore, anche dopo l'eliminazione dei tamponamenti e risultare fastidioso per chi sosterà nelle terrazze.

Per quanto riguarda la qualità acustica generale dell'edificio (caffè letterario, sale espositive, hall, laboratori) saranno prese tutte le dovute cautele per eliminare ogni disagio. Il progetto acustico terrà in considerazione il raggiungimento di una buona intelligibilità nel caso di messaggi di emergenza, e una diffusione sonora ottimale, per la musica di sottofondo.

Mi sembra doveroso sottolineare che durante tutta la fase decisiva e progettuale, cioè nella scelta degli scopi delle tecniche e dei materiali, si dovrà considerare che il raggiungimento di buoni risultati in campo acustico non può prescindere dal compromesso ottimo tra costi di realizzazione e benefici, tra scelte architettoniche e fisico-strutturali.

Sulla base di tale compromesso, per quanto riguarda gli spazi denominati auditorium e teatro Lenz, vedremo come nei capitoli successivi studi mirati li renderanno adatti ai rispettivi scopi.

Dato l'interesse e l'importanza in sede di progettazione acustica di tali spazi, vengono di seguito presi in considerazione per primi, per portare poi il centro dell'attenzione sull'intero comparto.

PROCESSO EVOLUTIVO DELL'ASSETTO ACUSTICO

6

6.1 PREMESSA

Molte delle scelte progettuali, costruttive ed acustiche, adottate soprattutto per gli spazi adibiti ad eventi musicali, non possono prescindere dall'esistente contesto architettonico musicale, ciò permette di dargli un collocazione culturale e un tessuto storico architettonico, sociale e soprattutto urbano.

Dalla comprensione ed elaborazione di tutto questo derivano le preferenze progettuali riguardanti le diverse funzioni che l'area dovrà considerare. Questa operazione risulta decisiva nel collocare i termini di paragone con cui si confronta e relaziona, soprattutto dal punto di vista acustico, fino ai giorni nostri, per sfuggire all'autoreferenzialità in cui sarebbe caduto senza l'ipotesi di inserimento in un contesto effettivo.

L'occasione ci è stata fornita dal luogo in cui viviamo, Parma. La sua secolare vocazione musicale, dall'odierno Festival Verdiano ai nomi illustri che costellano la sua storia, rappresenta un terreno fertile e idoneo ad accogliere un intervento come quello proposto.

Gli spazi oggetto di questa relazione, vogliono rappresentare elementi innovatori complementari al panorama acustico urbano, non direttamente paragonabili alle sale protagoniste del panorama parmigiano per le ridotte dimensioni e la diversità degli intenti.

6.2 PARMA E LA MUSICA

Sin dagli albori Parma è cresciuta in un ambito culturale molto fervido e ricco, dalla storia secolare ai giorni nostri. Il panorama odierno sfoggia la caratteristica passione per l'arte della musica che si fondano nelle radici storiche della città.

Negli ultimi anni l'impronta di forte sviluppo che le istituzioni hanno saputo dare alla cultura musicale si è tradotta in numerose e importanti iniziative, che si sono concretizzate nella fondazione di nuovi organi e istituti.

Nel 1999 cominciano i lavori per L'Auditorium Paganini, su progetto dell'architetto Renzo Piano. L'Auditorium è il risultato della scelta del Comune di Parma di potenziare il sistema dei teatri e dei contenitori culturali cittadini con una struttura di grande pregio estetico e funzionale, che pone Parma fra le città italiane più attrezzate dal punto di vista musicale.

Nasce fra le mura di Palazzo Cusani, nel 2002, l'istituzione Casa della Musica, con il compito di incentivare e diffondere la cultura musicale, senza limitazioni cronologiche, geografiche e di genere musicale. Accanto alle attività legate alla ricerca e alla divulgazione delle espressioni musicali, alla tutela e valorizzazione del suo patrimonio e delle sue collezioni, la Casa della Musica è attiva anche come centro di produzione: dal punto di vista artistico organizzando rassegne concertistiche (dalla musica antica a quella contemporanea), dal punto di vista formativo realizzando numerosi programmi divulgativi e didattici, dal punto di vista editoriale pubblicando due collane librarie e una serie discografica.

Nell'ambito delle Celebrazioni Verdiane, nel 2000 hanno avuto inizio i lavori di restauro del Teatro Regio, volti a riportarne l'aspetto all'antico fasto e, al contempo, adeguando gli impianti e le dotazioni tecniche alle più moderne esigenze sceniche e produttive dei giorni nostri.

Degna di menzione è sicuramente anche la Casa del Suono, nata nel 2002, parte dell'istituzione della Casa della Musica. Essa nasce con l'obiettivo di realizzare, nello spazio suggestivo della ex chiesa di Santa Elisabetta, la sintesi del percorso storico e culturale della comunicazione e riproduzione sonora. Un centro di ricerca e divulgazione che – valorizzando la struttura architettonica appena restaurata – propone un percorso che coniuga gli strumenti del passato con le applicazioni delle tecnologie d'avanguardia, gettando lo sguardo – anzi l'orecchio – alle sperimentazioni future legate alla riproduzione musicale.

6.2.1 LE SALE DI PARMA

Nate per scopi differenti, le due maggiori sale da musica di Parma con cui ci si è posti a confronto nell'elaborazione delle scelte progettuali, seppur con i dovuti limiti, sono il Teatro Regio e l'Auditorium Paganini. Entrambe non sono confrontabili in termini di capienza e ricettività con gli spazi in analisi, pur tuttavia ne forniscono gli elementi per una comprensione più ampia e concreta delineando tratti comuni.

Si cercherà quindi di tracciarne brevemente i caratteri essenziali, i pregi e difetti.

6.2.1.1 IL TEATRO REGIO

il Teatro Regio é cresciuto portando già dalla nascita difetti noti fin al suo stesso creatore, Bettoli, che non ha potuto agire diversamente per i limiti spaziali del sito, per mancanza di un progetto alternativo e soprattutto per il riferimento a cui non poteva sottrarsi: il Teatro milanese del Piermarini, la Scala.

La tipologia era quella del teatro a ferro di cavallo, all'italiana, da cui non si poteva prescindere, nonostante i non pochi difetti che già gli si attribuivano, per questo motivo gli architetti ottocenteschi dovettero servirsi di mezzi tecnici per sopperire agli inconvenienti acustici propri di tale forma.

La concentrazione delle onde sonore in certi punti a causa della pianta ellittica, cioè delle pareti laterali convesse, i complicati fenomeni di riflessione prodotti dalle articolate superfici di palchi, logge, controsoffitti, fregi e cornicioni, sono alcuni dei difetti principali di questi teatri.

I palchetti chiusi, disposti gli uni sugli altri perpendicolarmente, hanno subito la critica dei maggiori esponenti dell'architettura francese della metà del Settecento per sortire una forma di introversione vagamente conviviale oltre a impedire una vista e un ascolto ottimali.



Figura 6.1 - I palchi del Regio.

Le scelte prioritarie adottate all'epoca per eliminare in parte queste carenze determinate dall'impianto formale a scarso rendimento acustico, sono l'uso di pareti in legno, di tappezzerie di stoffa, la fodera di velluto delle poltrone. L'abilità di certi architetti portò a risultati eccellenti considerando le scarse nozioni scientifiche allora a disposizione.

Dopo i bombardamenti, il terremoto dell'83, e i vari interventi di restauro susseguitisi da Carlo III di Borbone ai giorni nostri, l'aspetto acustico del Regio non è più quello conferito dal Bettoli ma conserva ancora la traccia indelebile dell'antico impianto che gli procurò tanta popolarità.

DATI TECNICI:

Anno costruzione_1821-1824

Progettista_Nicola Bettoli

Capacità_1200 posti

Superficie sala_230 mq (2141 mq – LxPxH 17x23x18)

Volume_4070 mc

Volume/persona_3.4 mc/p

6.2.1.2 AUDITORIUM PAGANINI

L'Auditorium Niccolò Paganini è nato per ospitare concerti di musica sinfonica e da camera. Sorge nell'antico zuccherificio Eridania, costruito nel 1899 e dismesso nel 1968. Rappresenta un esempio innovativo e ardito di recupero di archeologia industriale, all'interno del ridisegno di uno dei più importanti comparti urbani dei primi decenni del '900, dove si concentrarono i primi opifici (Macello Pubblico, Consorzio Agrario, Zuccherificio Eridania, Pastificio Barilla) e i grandi servizi tecnologici dell'epoca (Stazione delle Tranvie, Gasometro).

L'intervento, opera dell'architetto Renzo Piano, si compone di una sala per 780 posti, foyer, camerini, bar, uffici, guardaroba, locali tecnici. Il progetto ha comportato la demolizione delle due testate dello stabilimento per ottenere al suo interno una sorta di 'cannocchiale' visivo, realizzato con l'uso di grandi vetrate che delimitano gli spazi del foyer e della sala da musica e che fanno del parco circostante la scena naturale per questo grande palcoscenico.

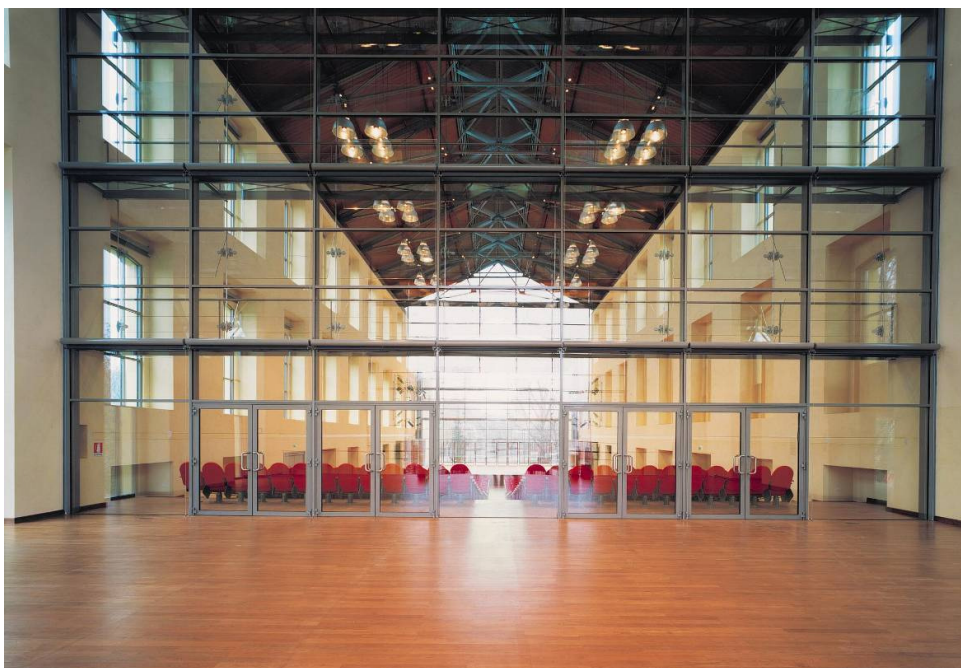


Figura 6.2 – Interno dell' Auditorium Paganini.

La struttura è dotata di sofisticati impianti tecnologici e acustici, approntati, questi ultimi, in seguito a diversi studi e prove in sito necessari per correggere i difetti che la sala presentava. L'ambiente non è infatti dei più accomodanti per quanto concerne l'acustica. La pianta allungata e retta, le pareti nude e squadrate, le numerose finestre e le due testate vetrate sono l'esorcismo di ogni designer acustico.



Figura 6.3 – Parete vetrata del Paganini.

Nonostante la dimensione contenuta della sala, queste caratteristiche influiscono negativamente sulla propagazione del suono, sortendo effetti indesiderati, di cui il maggiore riguarda la riflessione dell'onda. In genere le sale a pianta rettangolare hanno tra i pregi un time-delay-gap buono, poiché la riflessione laterale è quasi simmetrica e molto breve – in termini di millisecondi - a differenza del tipo a ventaglio. In questo caso vi si aggiungono le riflessioni dovute alla parete di fondo e a quella che funge, per così dire, da scena, cioè la parete vetrata dietro al palco. Queste provocano riflessioni che, successive ai primi 120 ms, sono percepite distintamente al suono diretto, e quindi non partecipano alla riverberazione, ma creano veri e propri echi. Questo difetto si accentua nei posti a metà della sala; nelle prime file il suono diretto prevale sulle riflessioni provenienti da dietro, nelle ultime tali onde riflesse risultano abbastanza brevi da non creare distacchi distintamente udibili; nelle file centrali invece la differenza di cammino fra l'onda diretta e quella riflessa dalla parete posteriore è tale per cui giungono all'orecchio due suoni distinti, producendo una specie di effetto delay, ovviamente non voluto.

Per questo motivo la vetrata d'ingresso è stata resa diffondente con un sistema di inclinazione degli elementi, in modo da "spargere il suono" nel volume. Sono in pratica, una sorta di dissipatori di energia sonora, aventi lo scopo di prolungare la corsa delle onde cosicché arrivino alle orecchie degli ascoltatori con un livello di pressione abbastanza basso da non essere percepito.



Figura 6.4 – Pannelli diffondenti sospesi.

Sono poi stati installati dei pannelli sospesi riflettenti, aventi la funzione di diminuire la distanza della prima riflessione delle onde che si dirigono verso l'alto, che altrimenti ricadrebbero dopo troppo tempo data l'altezza notevole di 18 metri (la stessa del Regio). Questo porterebbe ad un'eccessiva diminuzione del livello di pressione sonora in sala e la presenza di effetti sgraditi di riflessione.

DATI TECNICI

Anno costruzione_1999

Progettista_Renzo Piano

Capacità_780 posti

Superficie sala_864 mq

Volume_13.000 mc

Volume/persona_16.6 mc/p

6.2.2 CONFRONTO REGIO - PAGANINI

Secondo un confronto dell'acustica del Regio con quella del Paganini, (i cui risultati sono stati riportati agli atti del Congresso AES Italia 2007 tenutosi a Parma, presso la Casa della Musica, in novembre, poi elaborati dal LAE), sono stati ottenuti dati interessanti, di seguito menzionati.

I dati sono stati ottenuti con rilievi fonometrici all'interno delle strutture utilizzando una testa binaurale come ricevitore, collocata in diversi punti nella sala, e un dodecaedro come sorgente.

Nell'Auditorium il decadimento della pressione sonora è molto più lineare che nel Regio, a causa della geometria più semplice, scevra da fregi, decori e soprattutto da palchi e logge, che generano riflessioni poco controllabili.

Nel Regio abbiamo un livello di intensità Strength (G) minore che all'Auditorium, ma abbastanza omogeneo per ogni frequenza: il suono risulta quindi ricco, se non appena carente di toni alti. Il Paganini presenta un livello di intensità sonora maggiore, dovuta all'ambiente più riverberante, ma la distribuzione in frequenza risulta disomogenea, con un "picco" a 1 kHz e alle alte frequenze, dovuto alle riflessioni prodotte dalle vetrate.

L'acustica del Regio, essendo più "asciutta", risulta ovviamente anche più chiara. Questo bene si addice ad un teatro d'opera, dove è importante la comprensione dei testi del cantato. Altrettanto alta risulta comunque anche quella del Paganini relativamente al tipo di performance che ospita.

Dopo 80 millisecondi invece che le due sale differiscono notevolmente, perché il maggior riverbero dell'Auditorium prevale, mentre l'ambiente più secco del Regio accentua i difetti nel tempo, essendo carente in riverbero, oltrepassando la soglia accettabile dell'indice.

La definizione del Regio risulta superiore a quella del Paganini, infatti le rappresentazioni operistiche esigono una maggior intelligibilità.

Chiarezza		
dB	Paganini	Regio
C50	2	2.86
C80	3.92	6.49

Tab. 6.1 –Valori di Chiarezza a confronto.

Sebbene dalle verifiche acustiche emergessero difetti e pregi di ciascuna sala, il test soggettivo ha evidenziato una predilezione per il Regio sia nell'esecuzione di pezzi orchestrali che vocali, quando i risultati dicono che il vecchio Teatro è fin troppo asciutto per il cantato.

Appare invece percepita una minor presenza di basse frequenze nel Regio rispetto all'Auditorium, come, in effetti, si riscontra nelle prove. L'orecchio coglie la mancanza di bassi nell'uno, e avverte meno il reciproco, cioè la carenza di alti nell'altro.

È dunque importante considerare che la percezione del suono, essendo alla fine dei conti soggettiva, risente dell'influenza delle condizioni ambientali, culturali e storiche dell'ascoltatore e del contesto. La città di Parma non potrebbe rinunciare al suo Teatro Regio, nonostante i suoi difetti.

6.3 L'IDEA DELLA TIPOLOGIA MULTI PURPOSE HALL

Nell'analisi acustica che segue vedremo come molti degli aspetti critici presenti in larga scala nel Paganini, come la pianta rettangolare, la presenza di elementi ad acustica variabile così come i pannelli diffondenti discreti a soffitto, si riproporranno nelle sale in progetto.

Pur tuttavia non potendo confrontarle direttamente con le note sale parmigiane, data la ristrettezza degli spazi a disposizione e la diversità di forma e d'intenti costruttivi, si devono inserire come elementi innovativi *complementari* all'offerta acustica architettonica urbana attualmente presente,

ossia un'alternativa del tutto moderna che ottimizza lo spazio a disposizione per poter riunire aspetti culturali, ricreativi, didattici, musicali e artistici e poter essere così definita polo attrattivo urbano per eccellenza.

Nell'ottica di voler costruire uno spazio completamente nuovo che sfrutti a pieno le sue potenzialità, nasce l'idea di una sala ad assetto variabile, progettata in modo tale da poter rispondere a diverse esigenze di rappresentazione, non solo dal punto di vista architettonico e funzionale, ma anche dal punto di vista acustico.

Questo non significa solo predisporre gli spazi in modo adeguato per i diversi tipi di performance. Nel caso sussistano le condizioni si può proporre di utilizzare un auditorio anche per conferenze. Il rischio è che della conferenza, l'auditorio appunto, non comprenda una sola parola, perché magari il tempo di riverbero, giusto per musica d'orchestra, è troppo alto per il parlato, e l'uso di amplificazione finirebbe solo per accentuare il problema.

Uno spazio, per poter essere "intercambiabile" deve quindi essere progettato acusticamente a priori, anche solo pensare di adattarlo è una cosa tanto semplice a dirsi quanto difficile da realizzare. Per i motivi esposti, si sottolinea l'importanza di una progettazione integrata, che comprenda e studi tutti gli aspetti fin dall'inizio.

In particolare, l'Auditorium è uno spazio multi funzionale che potrà essere utilizzato ad uso cinema, conferenze, concerto jazz, concerto di strumenti acustici o amplificati, sala di ripresa fotografica e laboratorio di misura e di ricerca elettroacustica, oltre a sala di registrazione; e bene si inserisce a completamento del circuito dei teatri e sale da musica parmigiani per la novità che rappresenta.

La funzione proposta integra quelle esistenti ampliando le possibilità dell'offerta culturale, con potenzialità maggiori e diverse dai principali luoghi d'interesse. La capienza non poteva essere compatibile con la dimensione della città, perché relativamente contenuta, ma poteva raggiungere capacità attrattive da grandi numeri durante particolari eventi e manifestazioni.

Come si ottiene una sala ad acustica variabile? Da dove si comincia?

Prima di continuare nella trattazione mi sembra necessario iniziare col fare una breve rassegna degli esempi illustri di sale che introducono elementi ad acustica variabile, le quali, sebbene rappresentino una scala molto amplificata del caso di nostro interesse, sono spunti di tentativi di intervento interessanti. E' doveroso, infatti, confrontarsi con le esperienze passate e la letteratura attuale per poter intervenire con cognizione di causa in un nuovo progetto acustico.

6.3.1 ESEMPI ILLUSTRI

Nel fornire una breve panoramica dei diversi sistemi utilizzati per modificare l'acustica di una sala, i sistemi si possono sintetizzare nelle seguenti categorie:

- Variazione del volume dell'uditorio
 - Partizione o pannello mobile
 - Camere riverberanti
- Variazione dell'assorbimento acustico
- Riflettori mobili
- Diffusione variabile
- Proscenium concert hall
- Sistemi integrati

Le prime due soluzioni che permettono di variare i volumi in progetto implicano la possibilità di gestire grandi spazi oltre ad implicare grandi costi. Purtroppo date le ridotte dimensioni in gioco tali possibilità verranno scartate nell'analisi che segue. A titolo informativo, vengono di seguito enunciate.

Le **partizioni mobili** sono generalmente poco usate nel caso di separazioni verticali. Sono invece usate più di frequente per variare la superficie di un piano, riducendo di conseguenza anche la capienza di posti. Gli effetti sul tempo di riverbero sono solitamente rilevanti ma questo sistema presenta problemi strutturali non piccoli. L'elemento di chiusura deve avere una consistenza paragonabile ad una parete vera e propria, per ottenere risultati apprezzabili, ma deve poter essere movimentata agevolmente, e altrettanto agevolmente "sparire". I costi di realizzazione non sono banali e la riduzione della capienza è sicuramente uno spiacevole inconveniente.

Stocker Art Center, Lorain Community College, Lorain, Ohio

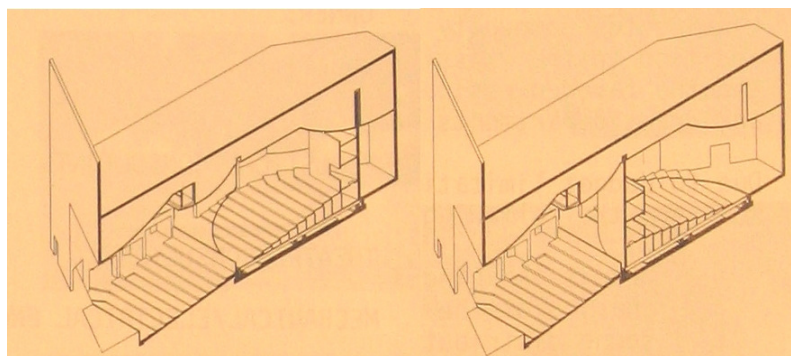
Inaugurazione: 1980

Architetto: Warren Finkel

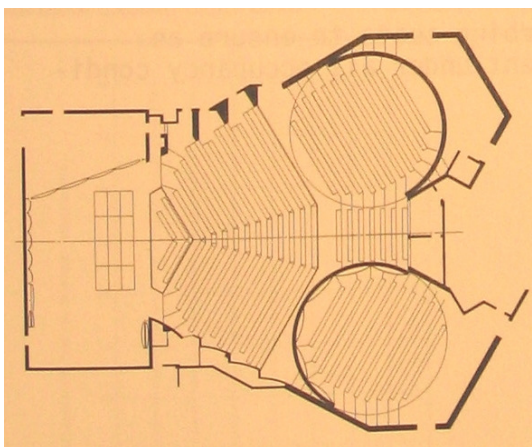
Consulente acustico: George C. Izenour

Costo: \$ 4,600,000

Posti a sedere: 983 – 545



(a)



(b)

Figura 6.5 – Sezione assonometria (a) e pianta(b) del Stocker Art Center.

Le **camere riverberanti** sono dei volumi aggiuntivi che vengono chiusi o aperti in funzione dell'assetto desiderato. Gli esempi realizzati consistono o in serie di stanze poste lateralmente alla scena nella parte alta del volume, che sono aperte da un sistema meccanico, o nell'apertura/chiusura di un divisorio sospeso con funzione di controsoffitto, per sfruttare lo spazio d'intercapedine fra esso e la copertura. Questo impedisce contrariamente a quanto avviene normalmente, di utilizzare tale volume per il collocamento degli impianti, comportando un costo aggiuntivo all'opera.

Dati gli scarsi risultati ottenuti questi sistemi non si sono diffusi nella progettazione, che predilige inevitabilmente scelte più economiche e affidabili.

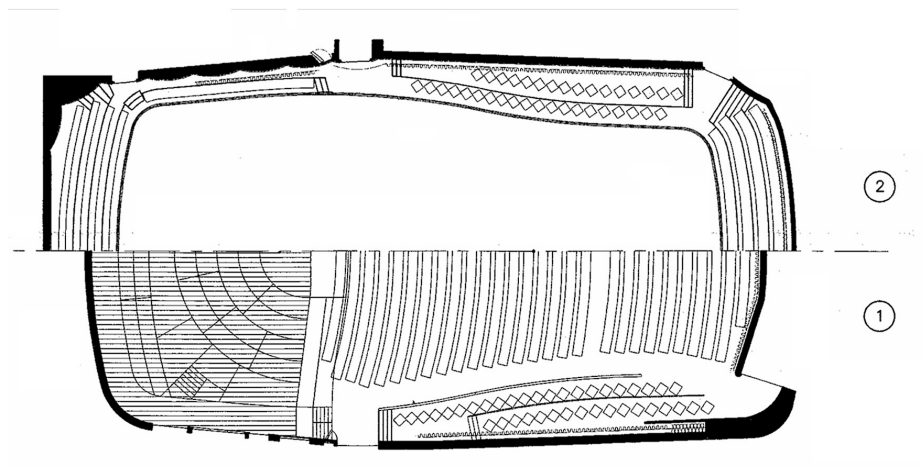
Culture and Congress Center, Concert Hall, Lucerne, Switzerland

Opened: 1999

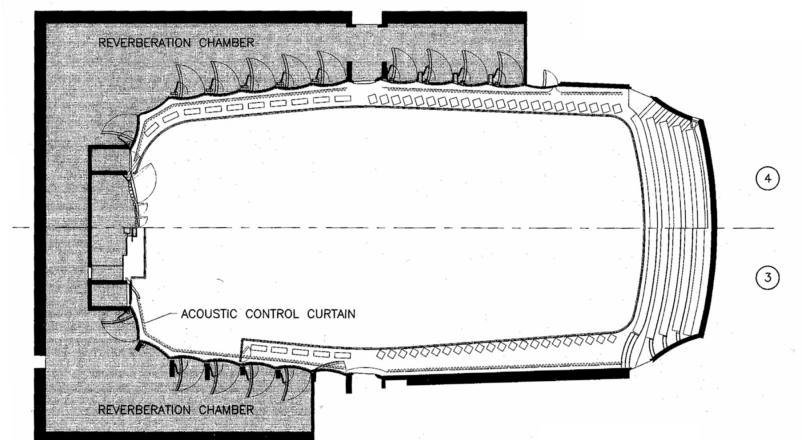
Architect: AJN Architectures Jean Nouvel

Acoustical consultant: ARTEC

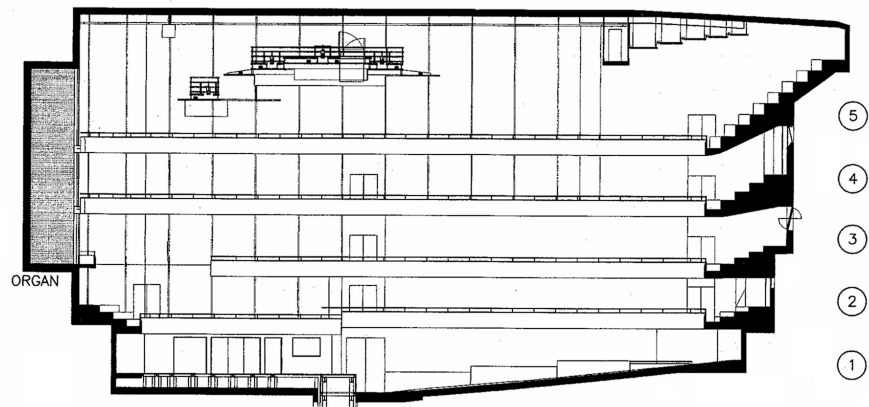
Seating capacity: 1892



(a)



(b)

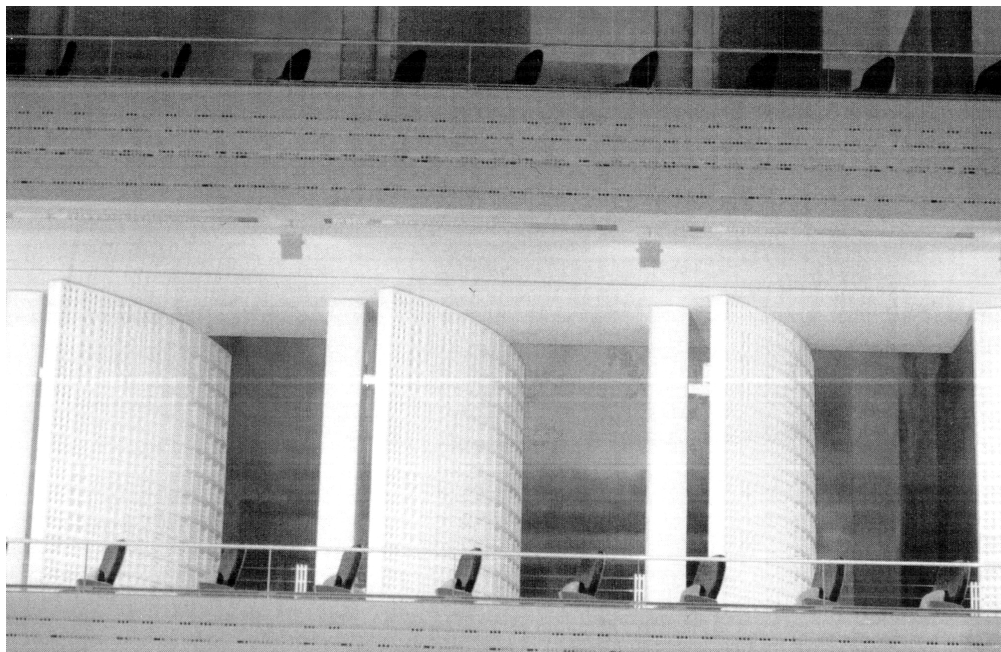


(c)

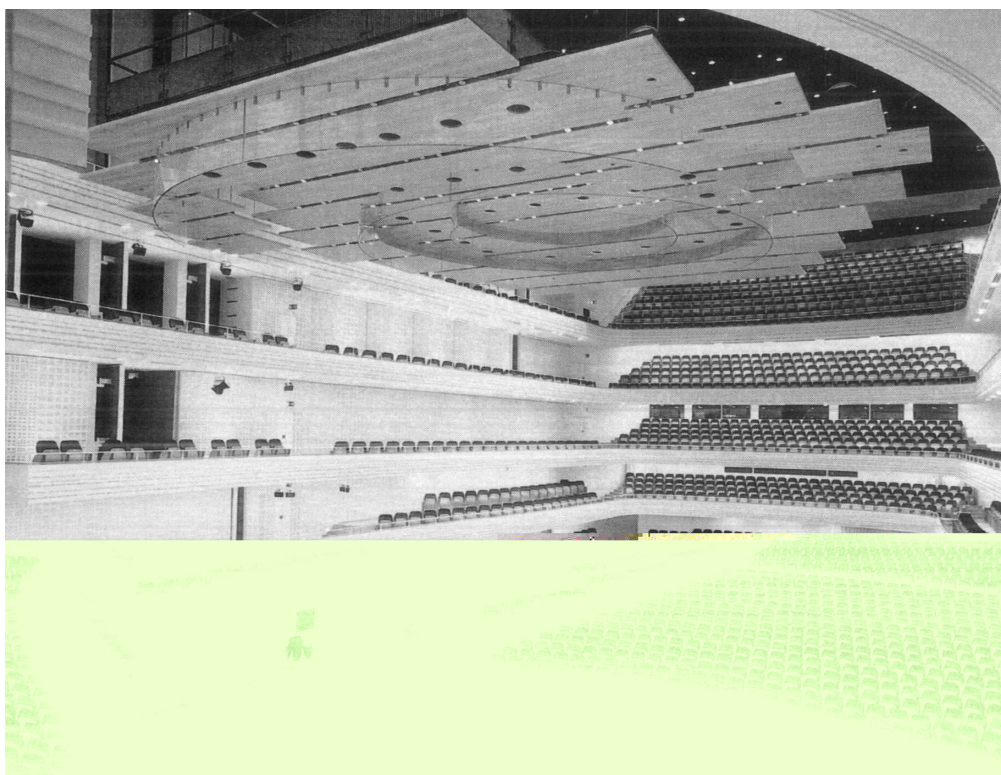
Fig.6.6 - Pianta piani 1° e 2° (a), pianta piani 3° e 4° (b) e sezione longitudinale (c) del Culture and Congress Center.



Fig. 6.7– Interno del Culture and Congress Center.



(a)



(b)

Fig. 6.8 – Particolare camere riverberanti (a) e immagine della sala e palcoscenico (b) del Culture and Congress Center.

La **variazione dell'assorbimento acustico** è la soluzione più diffusa. In una piccola sala una tenda retrattile è sufficiente per cambiare l'acustica in modo percettibile. Una tenda può essere sistemata in modo tale da variare la quantità del suono assorbito e, quando riposta in un'apposita cavità, esporre una superficie riflettente.

Se utilizzati nello spazio scenico, i pannelli assorbenti possono evitare rifrazioni laterali, ma per modificare il tempo di riverbero lo spazio in cui bisogna agire è quello della sala vera e propria. È possibile sia aumentare le superfici assorbenti delle pareti realizzando un sistema meccanico di "tende scorrevoli" (verticalmente o orizzontalmente), sia attraverso pannelli sospesi (stoccabili in compartimenti nascosti), sia integrando i due sistemi.

I problemi che questo sistema può dare riguardano il livello di pressione sonora, che potrebbe diminuire, e la possibile soppressione delle prime riflessioni. Questi aspetti devono essere debitamente verificati in fase di progetto, ma l'alto grado di versatilità che presenta questa soluzione consente alcune modifiche anche in opera.

Atorion Concert Hall, Akita, Japan

Opened: 1989

Architect: AXS Satou, Inc. & Nikken Sekkei Co., Ltd.

Acoustical consultant: NHK Engineering Service Inc.

Seating capacity: 706

Questo auditorio è allocato al quarto piano di un complesso edificio che contiene l'auditorio, un museo d'arte, un centro ricreativo, uffici e così via. Ha un piano esagonale ristretto e un volume della stanza di 8700 metri quadrati.

Come finitura degli interni, pareti e soffitto sono stati rivestiti con pannelli di cedro nativo di Akita. Per poter fornire ricche prime riflessioni verso i posti a sedere, queste mura sono state leggermente inclinate. Una unità di riverbero variabile è stata installata in entrambe le pareti laterali e la parete posteriore in modo da poter ridurre il riverbero e permettere alla sala di poter essere utilizzata per la musica tradizionale giapponese o come sala adibita a conferenze.

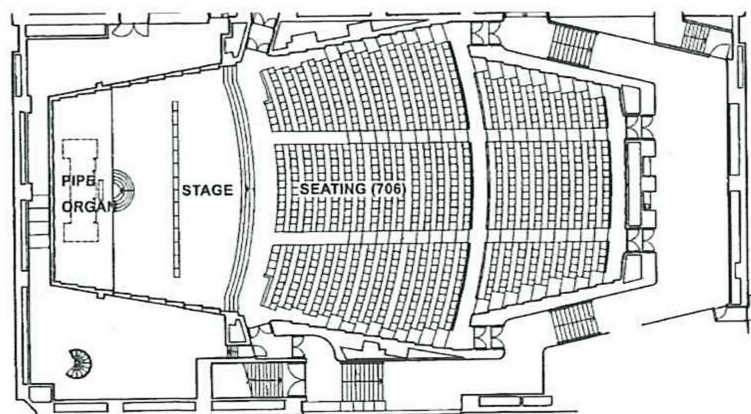
L'esterno dell'unità di riverbero variabile è composto da pareti riflettenti che si possono aprire o chiudere come porte. Dietro di loro ci sono cavità altamente assorbenti.

Con le porte chiuse all'unità di riverbero variabile, il più lungo tempo di riverbero misurato a 500 Hz è di 2,5 secondi, mentre con le porte aperte, è di 1,1 secondi (sala non occupata).

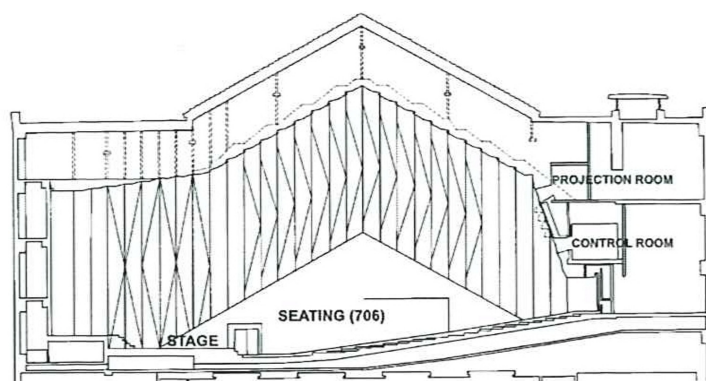
Le caratteristiche di risposta in frequenza sono quasi piatte su tutta la gamma. Per estendere ulteriormente il tempo di riverbero, questa sala è dotata di un sistema acustico assistito elettronicamente che può controllare il suono riverberante, dando la possibilità di cambiare ampiamente il tempo di riverbero fino a 3.4 secondi.

Inoltre, al fine di assicurare un ambiente solidamente tranquillo, strutture galleggianti furono incorporate in ogni elemento strutturale della sala. Con il sistema di aria condizionata acceso, sono stati realizzati, livelli di rumore di sottofondo minore di NC-20.

La possibilità di variare l'acustica con moduli elementari ripetuti risulta illuminante ai nostri scopi per la praticità di implementazione, la possibilità di poter adattare la tecnica anche a sale di ridotte dimensioni, il costo controllabile e soprattutto le prestazioni ottenibili in termini di variabilità nei parametri acustici.

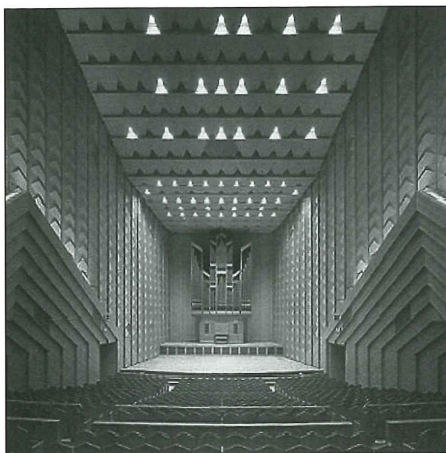


(a)

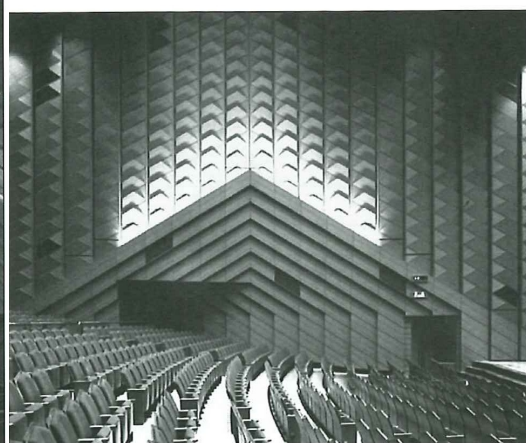


(b)

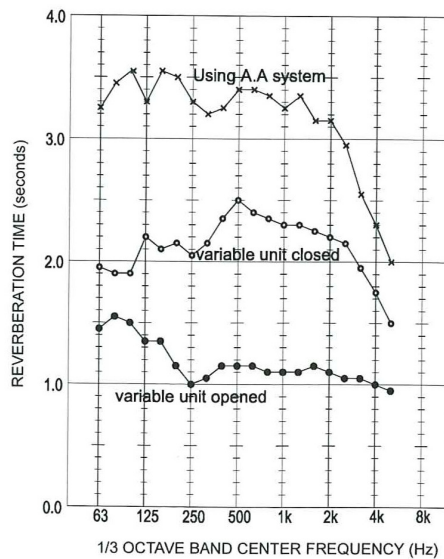
Fig. 6.9. – Pianta (a) e sezione (b) del Atorion Concert Hall.



(a)



(b)



(c)

Fig. 6.10. – Particolare dell'interno (a), sezione (b) e variabilità del tempo di riverbero (c) del Atorion Concert Hall.

Nella storia delle sale da concerto i **riflettori orizzontali sospesi** non hanno avuto molto successo: è ancora vivida nella memoria l'episodio della Philharmonic Hall di New York. Aperta nel 1962, fu il 55esimo progetto di Bolt Beranek and Newmann, e doveva rappresentare il fiore all'occhiello. Invece fu un vero disastro. Furono spesi oltre due milioni di dollari per tentare di correggere la pessima acustica e nel 1976 l'intero involucro della sala fu demolito e completamente ridisegnato. L'uso di questi riflettori doveva servire, nell'idea di Beranek, a diminuire l'initial-time-delay-gap, aumentando così ciò che lui chiamava intimacy, e che riteneva parametro fondamentale per una buona acustica. Il problema fu che questi pannelli penalizzavano le basse frequenze, con il risultato che la risposta della sala apparse povera di frequenze basse, e il livello sonoro precipitava lungo il percorso.

Questo deve portare l'attenzione, in fase di progettazione, alla disposizione, alle dimensioni e all'orientamento di questi riflettori, per non incorrere in spiacevoli problemi, difficili da risolvere a posteriori, come abbiamo visto.

Benché i riflettori sospesi orizzontali siano l'applicazione più ovvia, è possibile anche installare dei riflettori laterali.

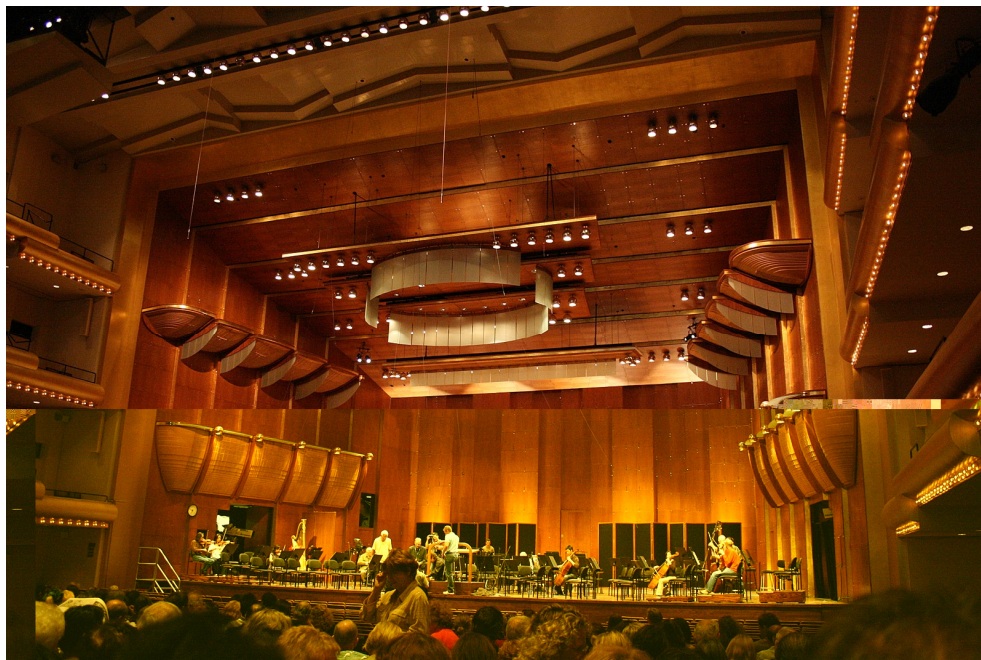
Avery Fischer Hall (ex Philharmonic Hall), Lincoln Center, New York

Inaugurazione: 1962 / 1973

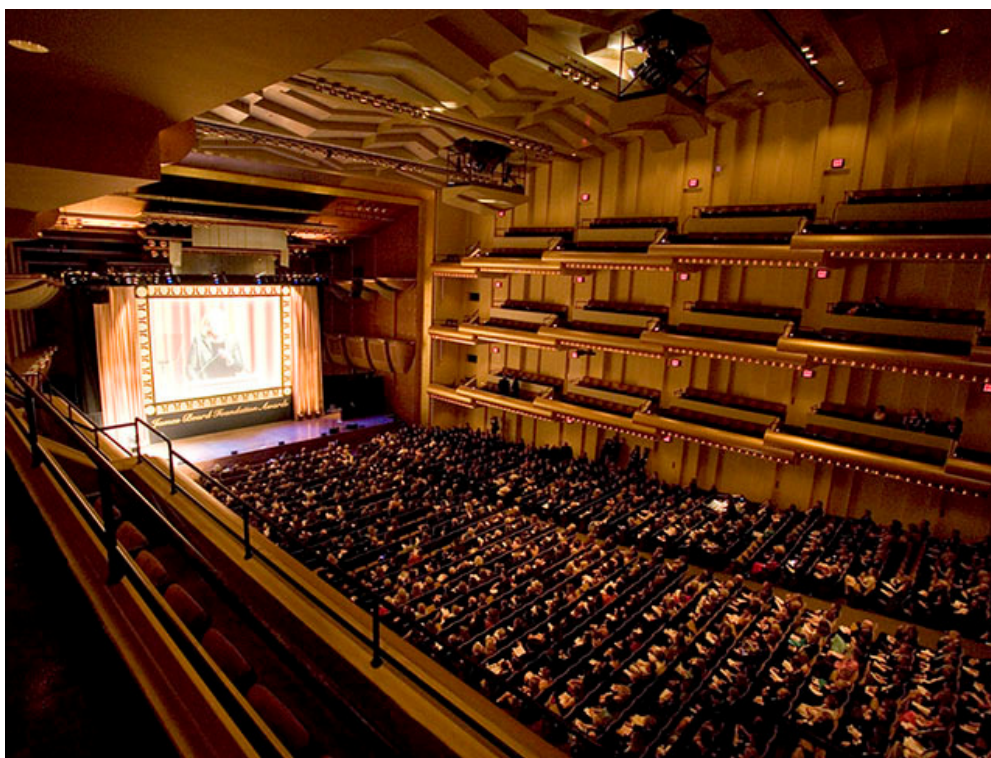
Architetto: Max Abramovitz / Philip Johnson

Consulente acustico: Bolt Beranek and Newmann / Cyril Harris

Posti a sedere: 2738



(a)



(b)

Fig. 6.11 – Interno del Avery Fischer Hall, palco (a) e sala (b).

Aula Magna, University of Caracas, Venezuela

Inaugurazione: 1954

Architetto: Carlos R. Villanueva

Consulente acustico: Bolt Beranek and Newmann

Posti a sedere: 2660

La caratteristica distintiva della sala senza dubbio l'esistenza dei famosi "piatti volanti". Per ovviare alla scarsa qualità acustica della sala originariamente progettata si analizzò la possibilità di inserire schermi acustici all'interno, sopra il pubblico. I pannelli inoltre vogliono esprimere caratteri artistici ben definiti.

Il problema di questo spazio era il rumore caotico generato dallo spazio a forma di ventaglio con soffitto a volta lucido. Data l'impossibilità di cambiare il progetto originario si analizzò la possibilità di aggiungere pannelli riflettenti. C'era bisogno di coprire un'area equivalente al 70% del soffitto per riflettere in maniera ottima il suono verso il pubblico. I pannelli furono sospesi sotto il soffitto e sulle pareti laterali.

Dapprima queste "nuvole" mobili sospese al soffitto con cavi speciali furono rese adattabili alla posizione desiderata dipendendo dal tipo di utilizzo della sala, poi alcune vennero fissate nella posizione che fu considerata come la più adatta per gli scopi della sala.



Fig. 6.12 – Particolari pannelli controsoffitto del Aula Magna, University of Caracas.



Fig. 6.13 – Aula Magna, Caracas.

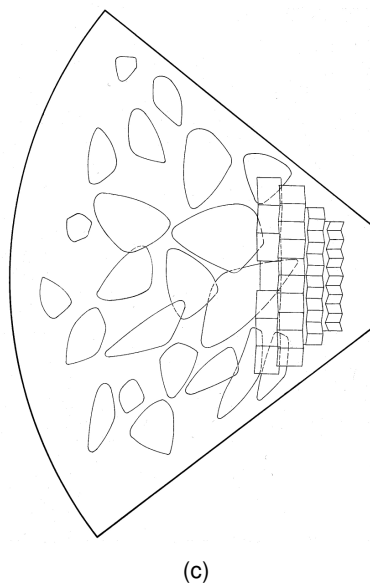
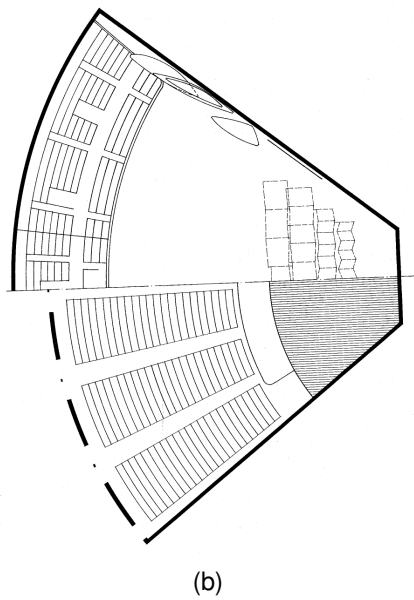
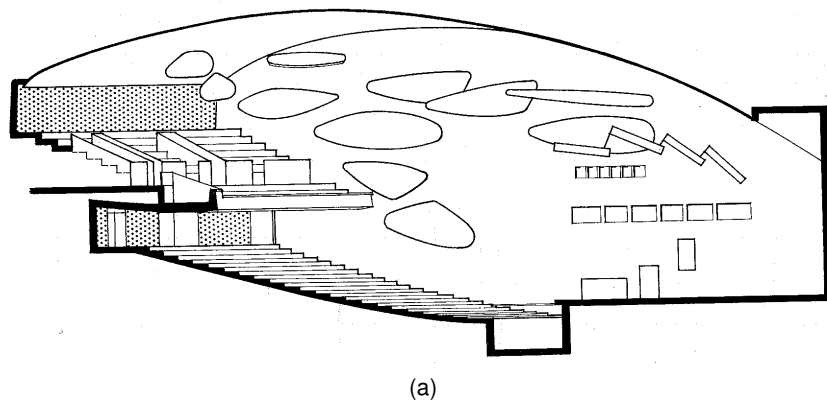


Fig. 6.14 – Sezione (a), pianta (b), pianta controsoffitto (c) dell' Aula Magna, Caracas.

Per cambiare una superficie da piana ad **acusticamente diffondente** si può agire sulle superfici orizzontali del soffitto o introducendo singoli elementi diffusivi, che hanno lo scopo di aumentare lo *scattering*, cioè la rugosità, ma gli effetti sull'acustica dell'ambiente non sono così rilevanti come quelli apportati da altri sistemi – variazione dell'assorbimento ad esempio – e non ne giustificano la spesa. Per ottenere variazioni udibili, bisognerebbe variare superfici estese.

Per completezza d'esposizione nella rassegna di sale ad acustica variabile, si enuncia la **proscenium concert hall** i cui elementi base sono lontani dalla attuali possibilità implementative: una sala da concerto aventi dimensioni da auditorium, dotata di proscenio e di tutti gli equipaggiamenti di una torre scenica. Un involucro è utilizzato per provvedere alla chiusura del palcoscenico durante i concerti. L'orchestra può anche essere posizionata in un palco aggiuntivo davanti allo stage. L'involucro è realizzato in diversi modi, in genere con materiale e forma riflettenti. Il soffitto inoltre si estende in genere nella sala, ed ha lo scopo di diffondere il suono il più possibile.

Uihlein Hall, Milwaukee Krannert Center, WI, USA

Inaugurazione: 1969

Architetto: H. Weese

Consulenti acustici: Bolt Beranek and Newmann

Posti a sedere: 2327



Fig. 6.15 – Palcoscenico della Uihlein Hall.

L'utilizzo di **sistemi integrati**, cioè di due o tre fra le tecniche descritte usate simultaneamente è sicuramente la soluzione migliore.

Nell'ambito delle sale ad acustica variabile con sistemi integrati, un esempio illuminante è fornito dall'Espace du Projection dell'IRCAM che per la pianta rettangolare, le medie dimensioni e quindi la capacità di udienza per lo meno comparabile ai nostri scopi, la versatilità di utilizzo, la praticità di realizzazione e i costi controllabili, ben si adatta ai nostri scopi fornendo interessanti spunti a favore. Di seguito verrà quindi fornita una descrizione esaustiva.

Espace du Projection, IRCAM, Paris

Inaugurazione : octobre 1978

Consulente acustico: M. Peutz

Posti a sedere: da 250 a 350 posti

Dimensioni orizzontali: 24m x 15,50m

Variabilità del volume : altezza del soffitto tra i 1,50m e i 10,50m

Variabilità delle caratteristiche acustiche : tempi di riverbero tra 0,4 e 4 secondi.

The "Espace du Projection" (ESPRO) dell'IRCAM (Institute de Recherche et Coordination Musique Acoustique), collegato organizzativamente al Centre Pompidou di Parigi, è stato concepito e costruito come una sala con una grande variabilità rispetto alla forma, il volume e soprattutto le proprietà acustiche.

L'Institut de Recherche et Coordination Musique Acoustique di Parigi è uno dei più grandi centri al mondo di ricerca pubblica dedicata alla creazione musicale e alla ricerca scientifica. Luogo unico in cui convergono la prospettiva artistica e l'innovazione scientifica e tecnologica, l'istituto aperto nel 1977 riunisce oggi più di centocinquanta collaboratori. Esso è ospitato in un edificio sotterraneo vicino al moderno Centre Georges Pompidou, ideato dagli architetti Piano e Richard Rogers.

L'Espace de projection è una sala ad acustica variabile che può essere indifferentemente utilizzata come sala da concerti, studio di registrazione e laboratorio di sperimentazioni acustiche; è stato quindi progettato per possedere la massima flessibilità e variabilità acustiche e dimensionali, potendo interessare anche cambi di volume.

Cambiando la riverberazione e mantenendo le dimensioni spaziali costanti – assumendo che non ci siano problemi con double decay (cap. 3) - si può cambiare il livello del suono riverberante, il raggio critico, il decadimento con la distanza dalla sorgente etc. Se si vogliono cambiare una o più di queste caratteristiche indipendentemente l'una dall'altra, bisogna non solo cambiare le proprietà assorbenti delle pareti ma anche le dimensioni spaziali della sala.

Poiché l'"Espace de Projection" doveva servire ad esplorare il significato dell'acustica degli ambienti per l'ascolto in generale e più specificatamente per la musica, era necessario poter creare una varietà di ambienti acusticamente differenti. Tutto ciò significa che a parte la variabilità spaziale, era necessario poter cambiare le proprietà assorbenti delle pareti e del soffitto.

Nel considerare il riverbero bisogna prendere in considerazione l'occorrenza del double decay, che è un parametro che bisogna saper controllare per poter ottenere la massima variabilità.

Questo significa che tutti i volume connessi dovrebbero essere assorbenti ed è in relazione a quanto che l'accoppiamento può essere limitato. La variabilità spaziale dovrebbe d'altro canto rendere possibile la creazione di stanze accoppiate in maniera che risulti in un double decay.

Tutte queste considerazioni unite a molte altre di natura tecnica ed economica e – da non dimenticare – quelle riguardanti la sicurezza, limitano la libertà di scelta nel determinare il massimo grado di variabilità che può essere raggiunto.

Nella figura seguente, l'"Espace de Projection", le cui dimensioni sono 25.5 x 17.5 x 15.2 metri cubi (6800 metri cubi). Esso occupa la parte più a nord dell'edificio dell'IRCAM.

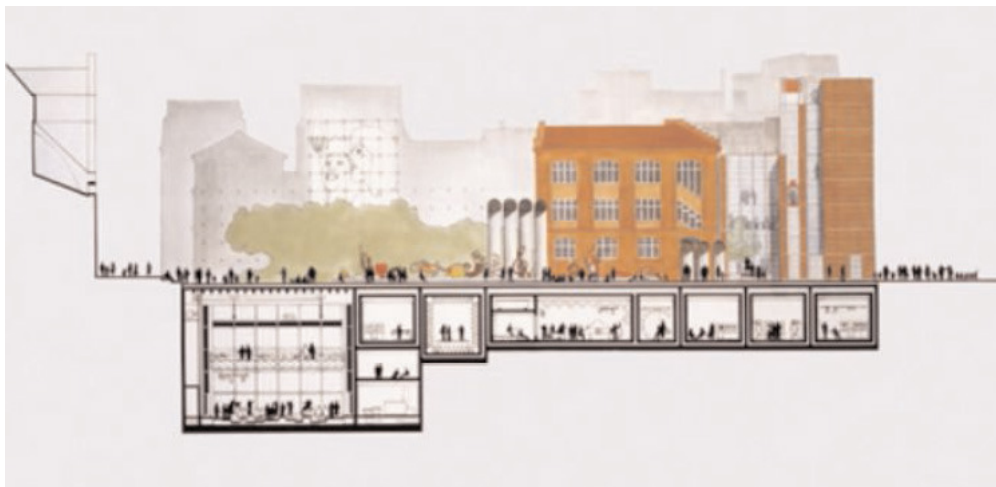


Fig. 6.16 – Sezione dell'IRCAM.

La grande stanza sotterranea sotto a sinistra è l' "Espace de Projection".

Dentro questa sala è posizionato un rivestimento interno che ha un doppio scopo, provvede ai mezzi per variare l'acustica e migliorare l'isolamento dell'ambiente. Le pareti e il soffitto della struttura interna sono costituite da elementi fatti da tre prismi rotanti. Le tre facce di questi prismi sono assorbente, piana (speculare) riflettente e diffusamente riflettente. La riflessione diffusa è raggiunta piegando il piano dei prismi come rappresentato in figura.

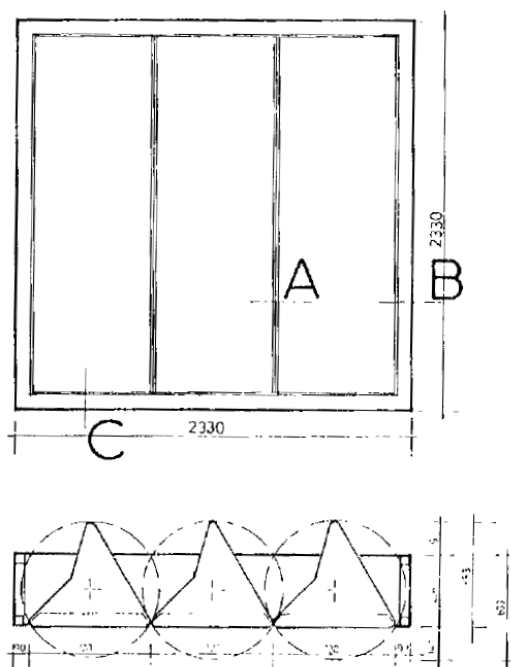


Fig. 6.17 – Vista piana e sezione orizzontale di un elemento consistente di 3 prismi rotanti. Le quattro pareti e i tre soffitti del “Espace de Projection” sono ricoperti da questi elementi.

Il numero totale degli elementi è diviso in due parti: la parte assorbente di una parte dei prismi è riempita con materiale assorbente principalmente alle basse frequenze, i rimanenti hanno un lato assorbente principalmente alle alte frequenze.

Le caratteristiche assorbenti dei materiali usati in relazione alla frequenza sono dati dalla figura 6.18 (a e b). Tutti i test fatti per trovare i materiali corretti e le strutture sono stati eseguiti in una stanza riverberante a norma (200 metri cubi).

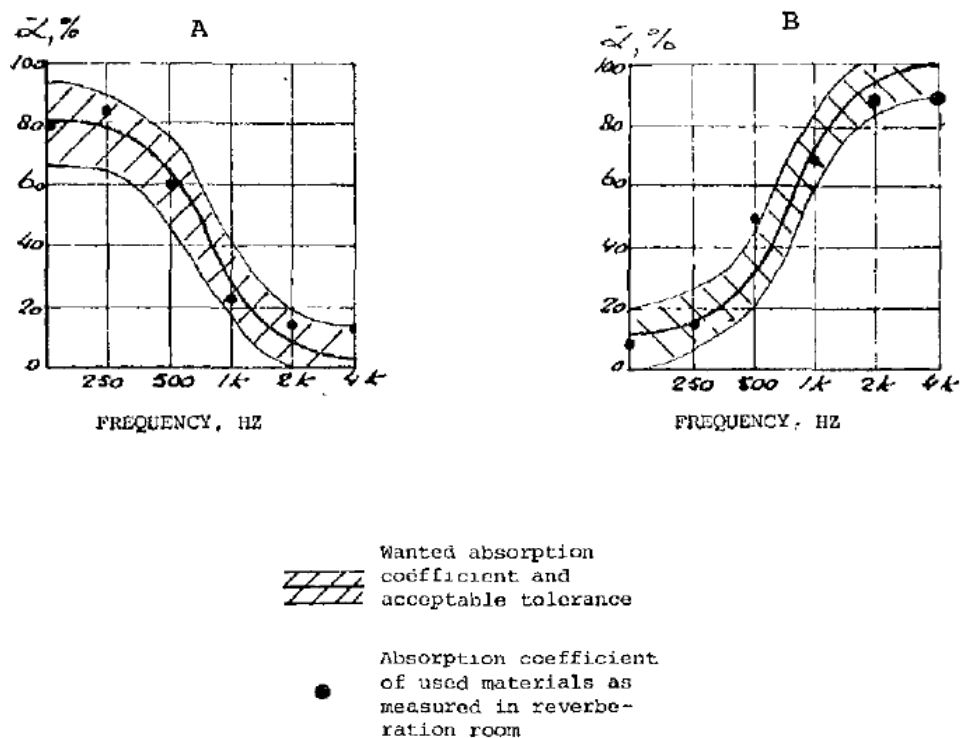


Fig.6.18 – Schizzi del progetto acustico dell'ESPRO. Metà dei pannelli assorbenti nei prismi rotanti ha proprietà assorbenti date da (a), l'altra metà ha proprietà come in (b).

Nel progetto originario il soffitto interno mobile della sala consiste in 3 parti, ognuna delle quali può sollevata o abbassata indipendentemente. Tra le varie parti del soffitto attraverso una fessura può srotolarsi una tenda su tutta la larghezza della sala, dando la possibilità di bisezionare o trisezionare la sala.

Gli stessi elementi che compongono le pareti interne sono usati sui soffitti mobili. I prismi di un particolare elemento possono rotare indipendentemente da quelli degli altri elementi, tutti i cambi e i movimenti possono essere manipolati meccanicamente nella stanza di controllo. Un computer controlla le rotazioni infinitamente variabili e le inclinazioni di questi prismi, misura, regola e varia la risonanza delle combinazioni di strumenti e amplificatori.

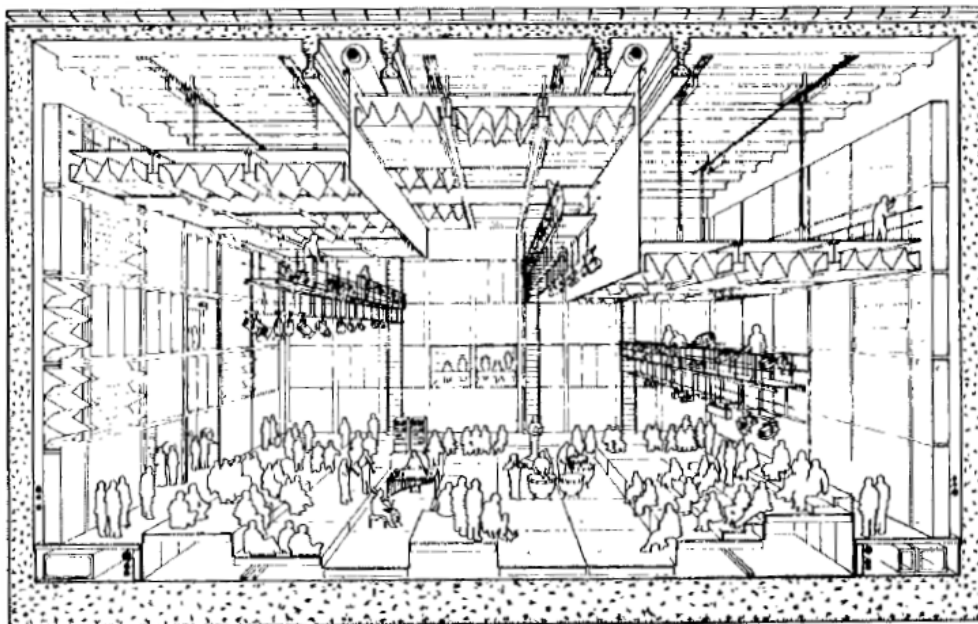


Fig. 6.19 - Visione artistica del "Espace de projection" durante le fasi di progetto.

Le pareti di questa stanza consistono di griglie d'acciaio con piccole suddivisioni quadrate, ognuna delle quali incornicia una finestra nel cui quadrante quattro gruppi paralleli di 3 prismi ciascuno possono essere girati, due gruppi in orizzontale e due in direzione verticale.



Fig. 6.20. Immagine attuale dell'interno dell'ESPRO.

Nella fase progettuale degli spazi adibiti a spettacolo nella Casa della Cultura di Parma, si trattava di scegliere fra una struttura versatile e una appositamente costruita per un determinato evento, probabilmente più performante ma meno flessibile. La Casals Hall (1987) di Tokyo, un piccolo gioiello di circa 500 posti, progettato dal noto architetto Arata Isozaky è rettangolare e relativamente piccola (6000 m.³ e 12 111² a persona), ha un tempo di riverberazione breve, pari a 1.6 secondi ed è stata pensata esclusivamente per la musica da camera e per altre esecuzioni di ridotte dimensioni.

Viceversa, la sala piccola (anche in questo caso, 500 posti) del villaggio della musica di Roma è costruita per offrire un'adattabilità che non può essere garantita dalla sala più grande (2500 posti). Dalla relazione di progetto di Renzo Piano per l'auditorium di Roma: « Per garantire il massimo di flessibilità e non sacrificare nulla in termini di resa acustica, decidemmo di non incorporare le tre sale previste in un unico edificio ma di farne tre indipendenti. [...] La più piccola, da cinquecento posti, è uno spazio totalmente flessibile. [...] il pavimento e il soffitto mobili, e la possibilità di intervenire sulle proprietà acustiche delle pareti. La sala da milleduecento posti ha elementi di flessibilità nel palcoscenico mobile e nel soffitto regolabile. Qui si terranno concerti di musica da camera e il balletto ».

6.4 LA SCELTA DEFINITIVA

Gli obiettivi che ci eravamo posti erano: la semplicità di utilizzo, la praticità di installazione e il costo sostenibile. La nostra disciplina, inoltre, ci ha insegnato che il passato è una piattaforma di partenza per il futuro, e lo sviluppo non può prescindere dalla sua comprensione e considerazione, negli errori e nei successi.

Gli spazi a disposizione per le sale denominate Auditorium e Lenz sono relativamente contenuti, circa 1500 metri cubi, e la variabilità acustica deve adattarsi alle forme di base e agli intenti ristrutturativi all'origine del progetto. Non abbiamo, quindi, piena libertà implementativa, essa è limitata anche dalle possibilità economiche e, a volte, anche dalle scelte estetico - architettoniche, che sovente vertono nella direzione opposta a quella di un'acustica ottima.

Abbiamo visto che i sistemi utilizzati per variare l'acustica di una sala sono diversi, ognuno con pregi e difetti. Come insegna la storia in qualunque campo la ricerca dell'integrazione è sempre la soluzione migliore. Data l'impossibilità di interagire con tutti i parametri in gioco, nel caso dell'Auditorium la nostra scelta si è dunque orientata verso un ridotto sistema integrato, che per molti aspetti vuole prendere ispirazione dall'esempio fornitoci dall' ESPRO, per motivi pratici, tecnici, economici e storici.

Il sistema da noi ipotizzato e progettato comprende diversi elementi tra cui la variazione dell'assorbimento, della riflessione e della diffusione con elementi modulari, variazione della diffusione anche con pannelli sospesi sopra le scene e moltiplicabili a tutto il soffitto, la presenza di pedane apribili dalle pareti laterali.

Farò ora solo un breve excursus di presentazione delle tecniche scelte, che verranno trattate in modo più approfondito e specifico nei capitoli successivi, quando si parlerà delle sale in dettaglio.

Nel caso del Lenz la variazione dell'assorbimento, che ci ha consentito di ottenere un abbassamento del tempo di riverbero, è realizzata con pannelli aventi rivestimento "scorrevole". L'assorbimento può

essere cioè ritratto, lasciando a nudo le finestre per aumentare il tempo di riverbero

Nel caso dell'Auditorium, i pannelli riflettenti sospesi sono stati pensati e realizzati come continuazione di un'ipotetica "camera d'orchestra". Sono costituiti da materiale riflettente, vale a dire con basso grado d'assorbimento, e hanno una superficie dinamica, come ali d'aereo, orientati verso i posti in sala. Hanno lo scopo di diminuire il time-delay-gap e diffondere il suono verso il fondo della sala. Sono posti dopo il proscenio e occupano solo 1/3 della superficie del soffitto.

L'ispirazione delle tecniche di realizzazione di uno spazio variabile data dall'illustre esempio dell'ESPRO, ha orientato la progettazione dell'Auditorium in una direzione ben definita. Da qui infatti è nata l'idea di introdurre delle strutture variabili anche alle pareti dell'Auditorium, simili ai prismi dell'ESPRO, ma in numero limitato e che contribuissero a variarne le proprietà acustiche. I motivi sono quelli elencati in precedenza, tra cui praticità e flessibilità di realizzazione oltre a costi contenuti; inoltre tante delle fruizioni dello spazio parigino sono riprese umilmente nel nostro caso, in versione ridottissima.

L'applicazione di questi sistemi ci ha permesso di ottenere risultati interessanti in termini di variazione acustica, mantenendo allo stesso tempo un'adeguata qualità, per entrambi gli assetti. In entrambi i casi, inoltre, i materiali sono stati scelti fra quelli con caratteristiche acustiche compatibili con l'estetica scelta dall'architetto.

Nel caso particolare dell'Auditorium però le richieste erano maggiori, l'obiettivo era creare uno spazio che fosse totalmente nuovo e che apportasse qualcosa di più rispetto alla multi funzionalità, sia essa musicale o conferenza. Una volta raggiunta la variabilità acustica in questo caso si richiedeva di più in termini di flessibilità e innovazione. Vedremo infatti come dalla possibilità di inserire solo quantità ridotte di elementi che influiscano a variare l'acustica della sala, possano dipendere solo limitate escursioni nella dinamica dei tempi di riverbero delle due sale.

L'Auditorium doveva essere uno spazio che emergesse dalle sale già esistenti in Parma, che apportasse elementi innovativi, e per questo anche discutibili, ma sui quali si dibattersero e si potesse sperimentare. Questo progetto rappresentava in qualche modo una nuova sfida.

6.4.1 GLI ELEMENTI INNOVATORI

Nell'avere la straordinaria possibilità di investire creatività e ingegno nel progettare degli spazi come quelli oggetto della seguente trattazione, è decisivo e importante dare uno sguardo agli esempi attuali e passati per carpire spunti progettuali, ma non sempre questi risultano sufficienti, è altresì corretto che emerga la creatività unica e personalissima del progettista.

Nel caso dell'Auditorium si è giunti alla conclusione che la variabilità apportata dagli elementi acustici non poteva essere sufficiente. Si è quindi voluto aggiungere qualcosa in più in termini di innovazione e dinamicità, per rendere questo spazio realmente unico nel contesto urbano.

Si è pensato quindi di giocare, non solo sulla variabilità degli elementi acustici, ma anche sul ruolo della flessibilità nella composizione musicale.

L'esempio calzante e illuminante è stato quello di Renzo piano e Vedova nell'allestimento temporaneo del "Prometeo" a Venezia dove l'itineranza della scena, il muoversi dei solisti e dei cantanti su apposite pedane, ruota intorno al pubblico. Nell'opera di Luigi Nono "Prometeo", per la quale Emilio Vedova realizza gli "interventi/luce", la grande arca sonora che accoglie il pubblico nella chiesa sconsacrata di San Lorenzo è infatti opera di Renzo Piano.



Fig.6.21. – L'Arca di Renzo Piano esposta a Venezia.

L'opera particolarissima è una composizione pensata per le scene, appare inevitabile agli occhi del compositore, ripensare alla struttura che dovrà ospitare l'opera. I teatri d'opera tradizionali, quelli d'impronta wagneriana, risultano inadeguati a tale scopo. Si rende necessario uno spazio architettonico che abbia requisiti precisi: "Mi appassionava l'uso dello spazio totale e insieme il grande progetto mai realizzato del teatro di Mejerchol'd, il progetto di Gropius per il teatro di Piscator entro i quali pubblico, scena, azione, spazi, invenzioni tecniche e testi sarebbero stati continuamente mobili, mai statici o frontali come la pratica tradizionale", dichiarava lo stesso Nono. Una struttura, inoltre, cui è richiesta grande flessibilità: deve garantire il montaggio e smontaggio nei vari luoghi in cui l'opera verrà rappresentata. Uno spazio architettonico itinerante. La commessa viene affidata a un giovane Renzo Piano: "Gli telefonai e gli chiesi se pensava di poter partecipare inventando qualcosa che stessee tra la cassa armonica e il rivestimento, in modo tale da avere lo spazio per tante cantorie, le quattro orchestre, i solisti delle voci e degli strumenti e le isole e con la possibilità di piazzare microfoni e altoparlanti in vari punti, verso l'alto e verso il basso, in lungo e in largo: cioè uno spazio spaziente". L'incarico, dunque, consiste nell'ideazione di uno spazio musicale, non di una semplice scenografia. Il progetto nasce da due suggestioni fondamentali: la cassa armonica, come "astuccio" ideale per far risuonare perfettamente il Prometeo; la barca, nella sua struttura semplice e geniale, per generare le chiglie portanti in legno lamellare. Una base rettangolare di 23x25 metri, quindici chiglie portanti e un'altezza totale che raggiunge i 14 metri. Il centro della scena è riservato al pubblico; le passerelle dislocate intorno accolgono solisti, coristi, musicisti, direttori d'orchestra.

Il suono, controllato dalla postazione di regia, avvolge l'ascoltatore e lo rende parte integrante. Piano precisava che questi archi montati su più piani nei quali il pubblico si trovava in mezzo ai musicisti, funzionava come un immenso strumento di musica, per il sistema di risonanza che produceva.

La prima a Venezia, il 14 settembre 1984, nella sconosciuta ma acusticamente ineccepibile chiesa di San Lorenzo. La critica si divide fra toni entusiastici e sporadiche polemiche legate ai costi.



Fig.6.22. – I musicisti nei vari piani dell'Arca.

L'idea di inserire delle pedane rialzate estraibili dalle pareti dell'Auditorium è opera del responsabile del team acustico, Paolo Galaverna. I musicisti potranno suonare da un livello privilegiato circondando il pubblico in sala.

Lo studio condotto in questa sede considererà il progetto acustico vero e proprio, i temi riguardanti l'analisi della sensazione sonora in sala proveniente dalle diverse fonti musicali, l'auralizzazione della composizione, sono tematiche proposte come sviluppo futuro del presente lavoro.

6.5 ITER PROGETTUALE

Considerato che forma e dimensioni delle due sale sotto analisi, Auditorium e Lenz, sono le stesse, poiché speculari nello stesso edificio, tanti dei problemi progettuali, riguardanti per esempio la copertura, saranno gli stessi. In questa sede quindi l'analisi si concentrerà soprattutto sull'Auditorium che racchiude varie difficoltà progettuali; tanti spunti saranno poi riconsiderati in uguale misura nello studio acustico del teatro Lenz.

Tra le destinazioni d'uso dell'Auditorium citiamo il cinema, il teatro, l'evento musicale, l'evento amplificato parlato, la conferenza e lo studio di registrazione. Possiamo quindi individuare le due configurazioni con caratteristiche acustiche che più si distanziano tra loro, esse sono la sala da concerto per musica acustica e quella adibita a conferenze. I dati si possono così riassumere:

Il parametro acustico che ha maggior rilevanza è fra questi il Tempo di Riverbero, che come già abbiamo visto, è in funzione del volume e della superficie assorbente presente. Esiste diversa letteratura riguardo i valori ottimi del tempo di riverbero, nei grafici e nelle tabelle che seguono riportiamo degli esempi. Inoltre sono riportati i massimi superiori e inferiori per i tempi di riverbero ottimo a 500 Hz suggeriti per via empirica per un teatro di circa 1500 metri cubi, il caso particolare dell'Auditorium, destinato agli utilizzi sopra elencati.

Nella progettazione acustica della sala sarà fondamentale dividere tra evento musicale ed evento

parlato, per i quali cambiano i valori nei parametri acustici. Differenziando tra le varie destinazioni d'uso, tra cui sala da concerto dedicata alla musica classica e leggera, studio di registrazione, cinema e auditorium per conferenze; ci concentreremo nell'analisi delle due configurazioni estreme, considerazioni particolari saranno fatte per gli assetti per così dire "ibridi", in particolare lo studio di registrazione. E' inoltre disponibile un impianto d'amplificazione sonora permanente nella sala la cui potenza è regolabile in base alla destinazione d'uso, in particolare nel caso d'evento parlato. Il nostro obiettivo sarà quello di realizzare una sala polifunzionale, che preveda un assetto ottimale per ogni configurazione, rispettando i limiti empirici di progetto qui esposti.

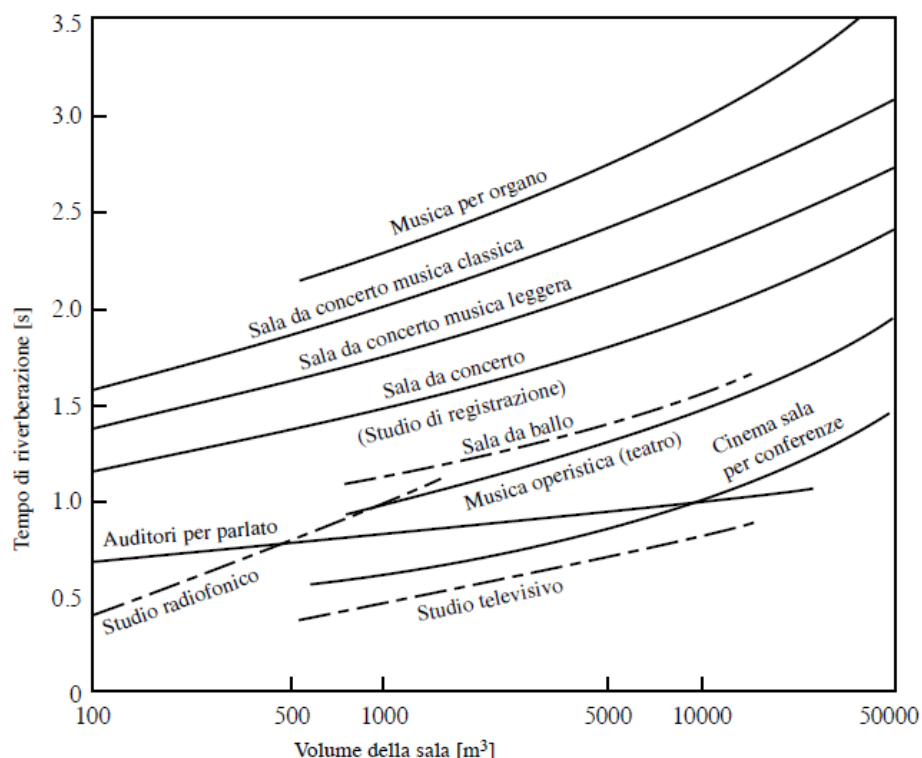


Fig.6.23 – Esempio di tempi di riverberazione ottimali in funzione delle tipologie e dimensioni degli ambienti acustici, tratto da Davide Foppiano, Dispense di Fisica Tecnica, Facoltà di Architettura Università di Genova.

Sala	Tempo di riverber. [s] a varie frequenze [Hz]								Prima riflessione	Posti
	$V/10^3$	$S/10^3$								
	[m ³]	[m ²]	125	250	500	1000	2000	4000		
Gerusalemme, Binyanei Ha'oomah	24.7	2.4	2.2	2.0	1.75	1.75	1.65	1.5	13-26	3100
New York, Carnegie Hall (pre-rest.)	24.3	2.0	1.8	1.8	1.8	1.6	1.6	1.4	16-23	2800
Boston, Symphony Hall	18.7	1.6	2.2	2.0	1.8	1.8	1.7	1.5	7-15	2600
Amsterdam, Concertgebouw	18.7	1.3	2.2	2.2	2.1	1.9	1.8	1.6	9-21	2200
Glasgow, St. Andrew's Hall	16.1	1.4	1.8	1.8	1.9	1.9	1.8	1.5	8-20	2100
Philadelphia, Academy of Music	15.7	1.7	1.4	1.7	1.45	1.35	1.25	1.15	10-19	3000
Bristol, Colston Hall	13.5	1.3	1.85	1.7	1.7	1.7	1.6	1.35	6-14	2200
Bruxelles, Palais des Beaux Arts	12.5	1.5	1.9	1.75	1.5	1.35	1.25	1.1	4-23	2200
Göteborg, Konserthus	11.9	1.0	1.9	1.7	1.7	1.7	1.55	1.45	22-23	1400
Lipsia, Neues Gewandhaus	10.6	1.0	1.5	1.6	1.55	1.55	1.35	1.2	6-8	1600
Basilea, Stadt-Casino	10.5	0.9	2.2	2.0	1.8	1.6	1.5	1.4	6-16	1400
Cambridge (Mass.), Kresge Auditorium	10.0	1.0	1.65	1.55	1.5	1.45	1.35	1.25	10-15	1200
Buenos Aires, Teatro Colon	20.6	2.1	—	—	1.7	—	—	—	13-19	2800
New York, Metropolitan Opera	19.5	2.6	1.8	1.5	1.3	1.1	1.0	0.9	18-22	2800
Milano, Teatro alla Scala	11.2	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.0	0.9	12-15	2500

Fig.6.24 – Tempi di riverberazione alle varie frequenze di alcune sale da concerto, tratto da Kinsler, Fundamentals of Acoustics 4a ed.

Tempi di riverbero							
Hz	125	250	500	1 k	2 k	4 k	8 k
Tr ottimo superiore Auditorium per parlato (tr ott=0.85)	1.28	1.02	0.85	0.74	0.70	0.71	0.76
Tr ottimo inferiore Auditorium per parlato (tr ott= 0.85)	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.68	0.64
Tr ottimo superiore Cinema, Teatri di Posa (tr ott=0.96)	1.44	1.15	0.96	0.84	0.79	0.80	0.85
Tr ottimo inferiore Cinema, Teatri di Posa (tr ott=0.96)	0.79	0.79	0.79	0.79	0.79	0.77	0.72
Tr ottimo superiore Sala da Concerto (Studio di registrazione) (tr ott=1.55)	2.33	1.86	1.55	1.35	1.27	1.29	1.38
Tr ottimo inferiore Sala da Concerto (Studio di registrazione) (tr ott=1.55)	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.24	1.16
Tr ottimo superiore Studi Radiotelevisivi (tr ott=1.25)	1.88	1.50	1.25	1.09	1.03	1.04	1.11
Tr ottimo inferiore Studi Radiotelevisivi (tr ott=1.25)	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.00	0.94

Tab.6.2. - Variazione del tempo di riverbero ottimo con la frequenza, estremi superiori e inferiori per una sala di 1500 metri cubi.

Considereremo le configurazioni di maggior interesse, il parlato e la musica, tra le quali vi è una notevole escursione. Possiamo dunque porci il problema in questi termini: come passare da un valore di riverberazione tipica di un evento musicale a quella per il parlato? In fase progettuale è auspicabile infatti intervenire in questa direzione, se gli interventi acustici possibili sono tali da raggiungere un livello accettabile per il tempo di riverbero. Sappiamo che possiamo aumentare o diminuire la quantità di superficie assorbente. Tra tutti gli interventi possibili meglio intervenire sul rapporto tra superficie riflettente e assorbente per “equalizzare” la sala.

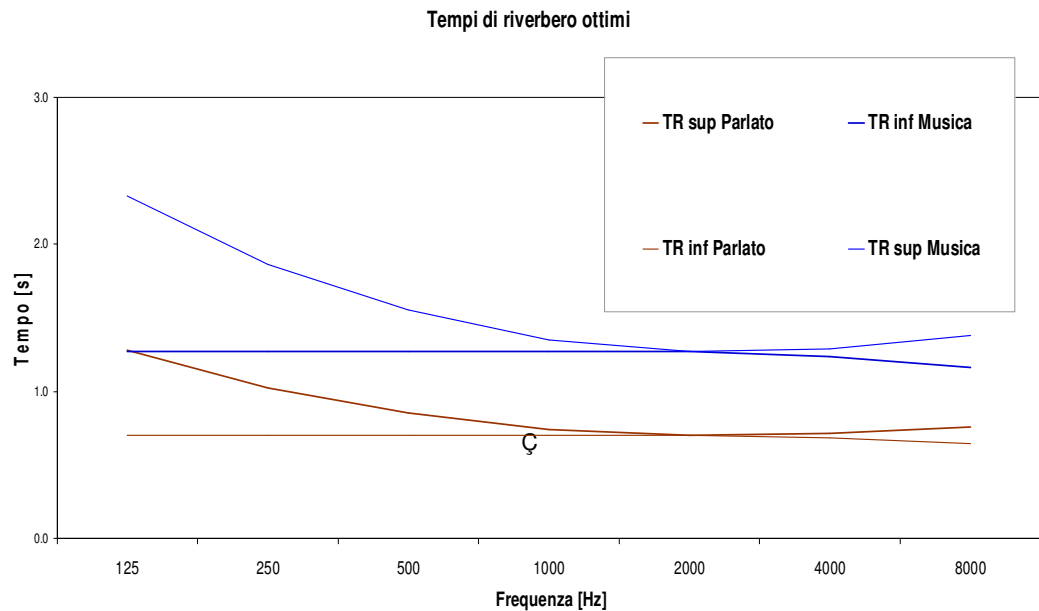


Fig.6.25. – Grafico dei tempi ottimi corrispondente ai dati in tabella 6.2.

Il punto critico però è quello di partenza, infatti non si può cominciare progettando esclusivamente un singolo assetto, verificarne la compatibilità acustica e pensare che una diversa configurazione risponda alle caratteristiche acustiche sperate. E' importante quindi sapere su che configurazione tarare il modello acustico iniziale della sala.

Un altro dato importante è la risposta all'impulso. Questa indica, in sostanza, la qualità della risposta della sala. Quando è buona, il grafico che rappresenta il decadimento del livello sonoro nel tempo, è "pulito", cioè abbastanza lineare, senza picchi particolari e code finali, che rivelano la presenza di forti riflessioni oltre la prima ed echi.

Se questi due indicatori sono soddisfacenti è sintomo che l'acustica dell'ambiente è discreta. Si può quindi procedere con una modellazione e verificare che il suono sia distribuito uniformemente all'interno dello spazio, e che non perda troppa intensità, rispetto alla sorgente, durante il percorso.

Grazie alla modellazione è possibile ottimizzare l'acustica, intervenendo con azioni locali nei punti critici della sala. Questo in generale è l'iter progettuale.

Vedremo nel capitolo successivo che da un'ottima modellazione acustica si possono trarre conclusioni soddisfacenti in termini di forme, materiali e interventi.

6.5.1 IL PUNTO DI PARTENZA

Il nostro prototipo di partenza era, per così dire, la sala nuda e cruda: la geometria, definita per i materiali principali e le dotazioni essenziali.

Le prime modellazioni acustiche eseguite avevano lo scopo di farci capire "come suonava la sala". Tale risultato ovviamente non può essere considerato separatamente dalla risposta all'impulso così come al decremento della pressione sonora, quindi il rapporto fra suono diretto e suono riverberato discreto.

In base ai risultati precedenti quindi, data la geometria di base, si può eseguire un primo lavoro per

smussare gli spigoli vivi presenti, per frammentare le superfici continue più estese in parti con angoli diversi di riflessione per aumentare la diffusività complessiva. Bisogna quindi distribuire in modo uniforme i vari materiali assorbenti all'interno della sala, specialmente nei punti critici: il muro di fondo, gli angoli d'incontro di due setti principali, e in generale dove avrebbero potuto generarsi riflessioni difficilmente controllabili. Questa operazione deve essere fatta avendo cura di non ottenere l'effetto opposto, cioè di limitare il diffondersi del suono nell'ambiente. Ovviamente queste operazioni descritte in poche righe, sono in realtà il riassunto di numerosi tentativi ed altrettanti errori.

Durante questo lavoro ci siamo però resi conto di come sia facile, nell'intenzione di correggere un parametro, peggiorarne un altro. Le caratteristiche acustiche sono, come abbiamo visto, strettamente correlate, e il rischio di un intervento per sanare un aspetto, a danno di un altro, non è per niente remoto, però, grazie agli strumenti e alla tecnologia moderna, è generalmente prevedibile e quindi evitabile.

La nostra base di partenza sarà in realtà un modello "ibrido", il passaggio successivo sarà quello di portare la sala ad un assetto definitivo per un utilizzo definito. L'ultimo passo sarà configurare la sala per concerti ed ottimizzare il modello. La scelta del sistema d'assetto variabile è stata dettata dalle considerazioni espresse fin'ora, e deve essere perfezionata, plasmata attraverso la modellazione fino a raggiungere gli effetti desiderati.

L'intervento sicuramente più consistente è stato la progettazione dei pannelli sospesi. La camera è costituita da un soffitto formato da moduli riflettenti, convesso verso la platea, e da pareti intercambiabili. A differenza dei moduli laterali, che sono mobili, il cielo acustico è appeso, viene semplicemente disgiunto quando non serve o aumentato in base alla configurazione. Tutte le superfici riflettenti sono in legno.

I pannelli sono in sostanza pensati come il continuo del soffitto della camera acustica, e sono disposti nel primo terzo del soffitto – partendo dal proscenio. Nelle grandi sale d'opera o di musica sinfonica, essi hanno normalmente dimensioni notevoli, ma diverse, per non privilegiare una frequenza rispetto ad altre. La forma "alare", inclinata alle estremità, serve per riflettere il suono verso i posti laterali e verso il fondo della sala. Sono state fatte diverse renderizzazioni acustiche che ci hanno permesso di accordare l'intero sistema ai parametri desiderati.

6.5.2 OBIETTIVI ACUSTICO-ARCHITETTONICI

La tipologia di spazio alla quale riferirsi è oggetto fondamentale di studio, punto di partenza e limite da superare che deve essere chiaramente definito nella parte iniziale della progettazione di una sala ad assetto acustico variabile.

Tramite il processo di trial and error da sempre utilizzato nell'architettura del passato e, nel caso specifico, nelle sale per lo spettacolo, i progettisti si sono sempre preposti due obiettivi principali: il superamento degli errori precedenti e il tentativo d'avanzamento, tramite la creazione di nuove modalità e forme, per il raggiungimento di desiderate caratteristiche.

L'obiettivo è la progettazione di una sala destinata prevalentemente alla fruizione musicale, che al contempo abbia anche le migliori caratteristiche di auditorium e - compatibilmente ad una certa flessibilità di utilizzo – di studio di registrazione, queste hanno, in ultima analisi, determinanti differenze rispetto alla prima.

Si è lavorato per progettare una sala che soddisfacesse appieno le necessità dell'uso concertistico e si sono analizzate le sue componenti tecniche senza la paura di apportare correzioni laddove la scienza acustica ed il gusto personale potevano fornirci indicazioni; una sala che fosse in grado di essere utilizzata con successo anche per una rappresentazione di conferenze tramite l'utilizzo di metodi efficaci e relativamente economici, così da essere effettivamente utilizzati e non restare, come l'esperienza ha più volte dimostrato, esercizi di tecnica fine a sé stessi.

7.1 PROGETTAZIONE ACUSTICA

7.1.1 APPROCCIO

L'approccio progettuale che è stato seguito contemplerà i più avanzati strumenti di calcolo e di misura presenti sul mercato. Per lo studio del progetto acustico delle due sale si è fatto largo uso del software Ramsete, ormai ben conosciuto fra i professionisti del settore. Si rimanda all'appendice C per approfondimenti riguardanti i dettagli di tale metodo di calcolo previsionale per l'analisi acustica. Nell'analisi è stata introdotta la geometria della sala, mediante un programma di CAD tridimensionale (Ramsete CAD), e si sono svolte tutte le elaborazioni necessarie per comprenderne il comportamento dal punto di vista acustico.

In particolare nel caso dell' Auditorium l'intervento considera la nuova costruzione dell'edificio, seppure con intenti restaurativi, per questo motivo i risultati avranno, una minore precisione assoluta rispetto al caso della ristrutturazione di un ambiente esistente.

Analizzando i primi risultati ottenuti si sono potute apportare modifiche alla geometria e ai materiali impiegati, si è potuto ripetere le elaborazioni e valutare di nuovo i risultati. Ciò fino a quando l'affinamento del progetto non ha portato ai risultati desiderati. Tali risultati sono stati prefissati tenendo presente il budget di spesa ma cercando di ottenere una sala polivalente, in grado cioè di poter ospitare concerti di piccole formazioni musicali, così come doveva essere possibile l'utilizzo della sala per convegni attrezzandola per videoproiezioni. Tale polivalenza si è potrà realizzare tramite un'accurata scelta dei materiali, dei rivestimenti ed altri accorgimenti che incidono in parte sul tempo di riverbero ma in modo più pesante sul reindirizzamento del campo sonoro.

Utilizzando il programma Ramsete si possono ottenere tutti i parametri oggettivi di qualità acustica (tempo di riverbero, indice di chiarezza, SPL, indice di intelligibilità del parlato...) necessari per la messa a punto dell'acustica di un teatro. Gli acustici, valutando tali parametri in ogni punto della sala, possono comprendere in che modo correggere il progetto al fine di rendere il comportamento acustico della sala il migliore ed il più uniforme possibile rispetto alla spesa prevista.

L'analisi acustica si concentrerà in misura maggiore sull'Auditorium piuttosto che sul teatro Lenz, per le similitudini di forma e la conformazione.

7.1.2 GEOMETRIA DI BASE

L'auditorium è uno degli spazi polifunzionali a carattere artistico e culturale compreso nell'edificio denominato Casa della cultura del complesso STU Pasubio. La geometria è dettata dalle scelte costruttive, basicamente dalla ripresa delle forme dell'edificio precedente, e soprattutto dagli intenti estetici e architettonici. La sua struttura quindi è a pianta rettangolare con volta leggermente puntata, le misure approssimative comprendono un volume di circa 1500 metri cubi, con un'area di base di 262 metri quadrati, estesa in altezza per 4.4 metri, sormontata infine da una volta di circa 3 metri in altezza. La struttura può prevedere una capienza di 149 posti a sedere.

Il pavimento è progettato piano, anche se, nella configurazione sala da concerto, la conformazione leggermente altimetrica della sala è preferibile, per migliorare la visibilità e la ricettività.

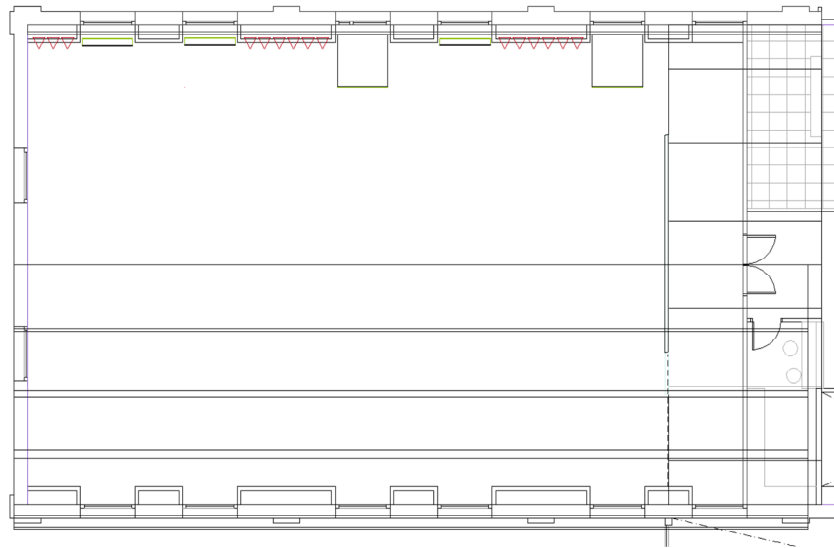
Nel caso di sala da concerto, le pareti laterali rettilinee riflettono il suono verso l'ascoltatore creando l'impressione che questo provenga non solo dalla sorgente ma anche dalle sorgenti virtuali poste ai lati del palco; ciò può modificare l'impressione spaziale favorendone l'ampliamento. Le riflessioni laterali hanno un ruolo fondamentale sia nella chiarezza dell'ascolto che nell'impressione spaziale dell'evento.

Con tale geometria, le ridotte dimensioni e gli obiettivi progettuali, l'allestimento interno è pressoché dettato. Nell'ottica di conferire alla sala il massimo grado di variabilità acustica, prismi a base semi triangolare si estendono per tutta l'altezza a ridosso delle parti libere delle pareti laterali, laddove non vi sono le finestre. Questi elementi frammentano le superfici continue ed estese delle pareti in parti ridotte, con angoli diversi di riflessione secondo la configurazione adottata, aumentando la diffusività complessiva.

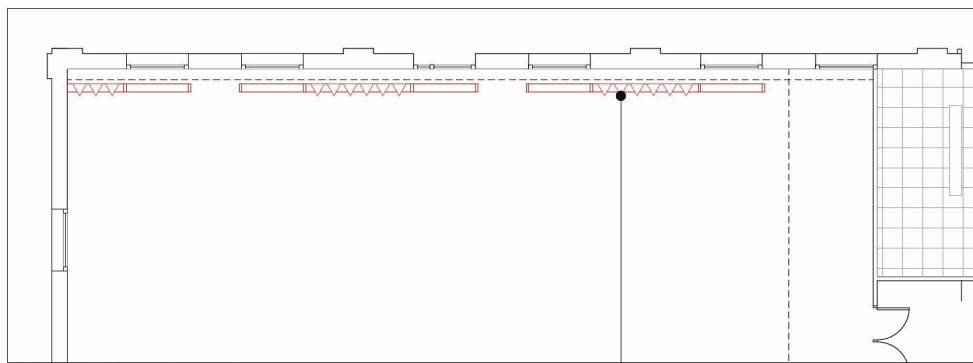
Tuttavia il difetto di questa geometria è l'ampia superficie della volta, che focalizza l'energia sonora in determinati punti e di conseguenza crea livelli di pressione sonora differenti fra punti anche poco distanti tra loro. La differenza di pressione fa sì che l'ascoltatore situato dove il livello è basso si senta poco coinvolto nella performance, ciò è importante ai fini della valutazione acustica, essendo il coinvolgimento uno dei fattori fondamentali per l'apprezzamento di una rappresentazione. La volta quindi richiede un'attenta bonifica.

Sono previste 10 pedane apribili nelle pareti laterali all'altezza delle finestre, per l'esercizio di musicisti, fonti di sorgenti sonore avvolgenti il pubblico in sala. Inoltre un eventuale palco mobile potrà assumere posizione centrale o a fondo scena: la posizione centrale sarà particolarmente utile durante la fruizione della musica proveniente dalle pedane.

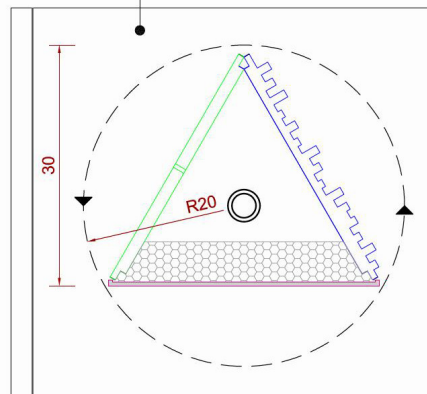
Infine la regia è progettata a balcone nella parete di ingresso; essa è estesa in larghezza e sopraelevata di circa 3.6 metri. Per la cabina audio i tecnici in genere preferiscono essere in un ambiente in comunicazione diretta con la sala, per cui la cabina sarà separata dalla sala da una semplice balconata. Questi locali tecnici possono creare casse di risonanza indesiderate e possono essere sorgenti di rumore involontario, per via delle apparecchiature ospitate e per le attività del personale che, durante gli spettacoli, deve lavorare. Sono proposti accorgimenti per ovviare a questi spiacevoli inconvenienti.



(a)



Pianta posizionamento pannelli



Part, pannello base triangolare

(b)

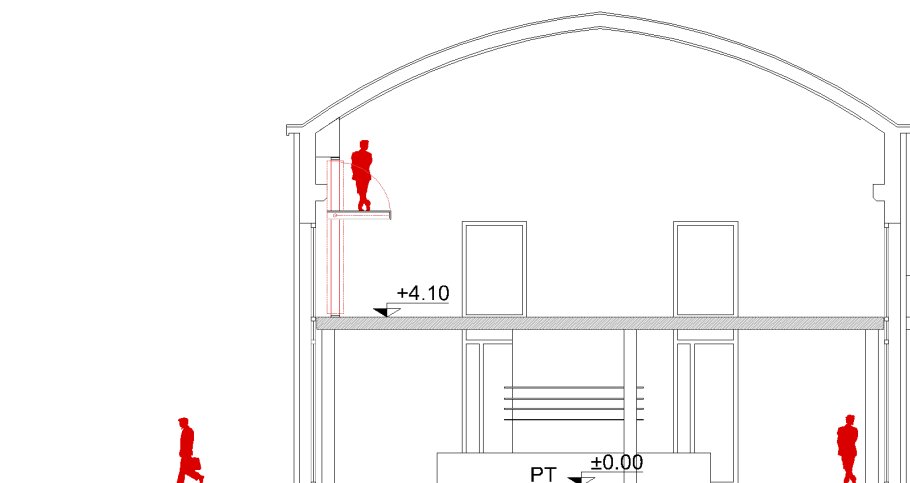


Fig. 7.3. Vista frontale sezionata in cui è visibile il soffitto a volta leggermente puntata.

7.1.3 LA CONFORMAZIONE DELLE PARETI

Le pareti di una sala da concerto così come per una sala da conferenza, sono un elemento architettonico fondamentale non solo per quanto riguarda l'estetica della sala ma anche per la funzione acustica che svolgono.

In questo caso, purtroppo, l'inclinazione delle pareti laterali non può essere oggetto di studio durante la progettazione della geometria di base, giacché questa è data. Tale analisi, infatti, permetterebbe l'ottimizzazione delle riflessioni che queste sono in grado di orientare.

Tuttavia, la scelta del materiale è altresì importante, in quanto, se la direzione principale delle riflessioni è funzione dell'angolo con cui queste interagiscono con le pareti, la quantità e la qualità è determinata prevalentemente dal materiale che ne costituisce la superficie e la sua conformazione.

Come già detto, uno degli obiettivi principali era l'effettiva realizzabilità degli interventi e delle metodologie acustiche prese in considerazione e quindi un buon compromesso tra costi e qualità richiesta, tra intenti architettonici ed esigenze acustiche. Per questo motivo, si è preferito fin da subito scegliere materiali strutturali che consentissero una buona resa qualitativa.

Uno dei problemi principali in questo tipo di sale dove l'assorbimento da parte del pubblico è sempre molto elevato, è quello di raggiungere un buon livello nel tempo di riverberazione, e rendere viva la sala. Da subito quindi, uno dei materiali proposti e presi in considerazione per le sue potenzialità architettonico-strutturali e le relativamente poco sfruttate qualità acustiche, è stato il cemento.

Questo materiale ha un coefficiente di assorbimento molto basso, favorevole quindi a supportare un elevato tempo di riverbero. Questa caratteristica si fa ancora più interessante se notiamo che il coefficiente di assorbimento è basso non solo per le alte frequenze ma anche per quelle minori, a tutto vantaggio di quel parametro definito come calore (warmth) della sala; inoltre, essendo un materiale ad elevato peso specifico, possiede ottime qualità d'isolamento acustico favorendo un'elevata silenziosità interna, anch'esso parametro fondamentale. La plasticità di questo materiale e la sua semplice lavorabilità per mezzo di casseforme, permette di modellare la superficie il modo che questa sia in grado di diffondere uniformemente il suono.

Anche in base alle esigenze estetico architettoniche, questo è il materiale scelto per il pavimento.

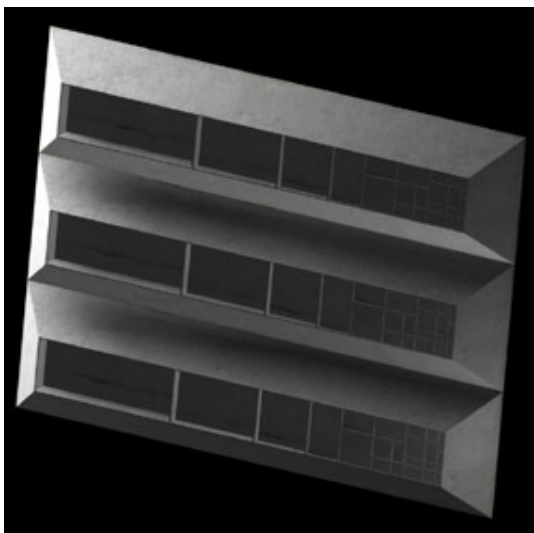


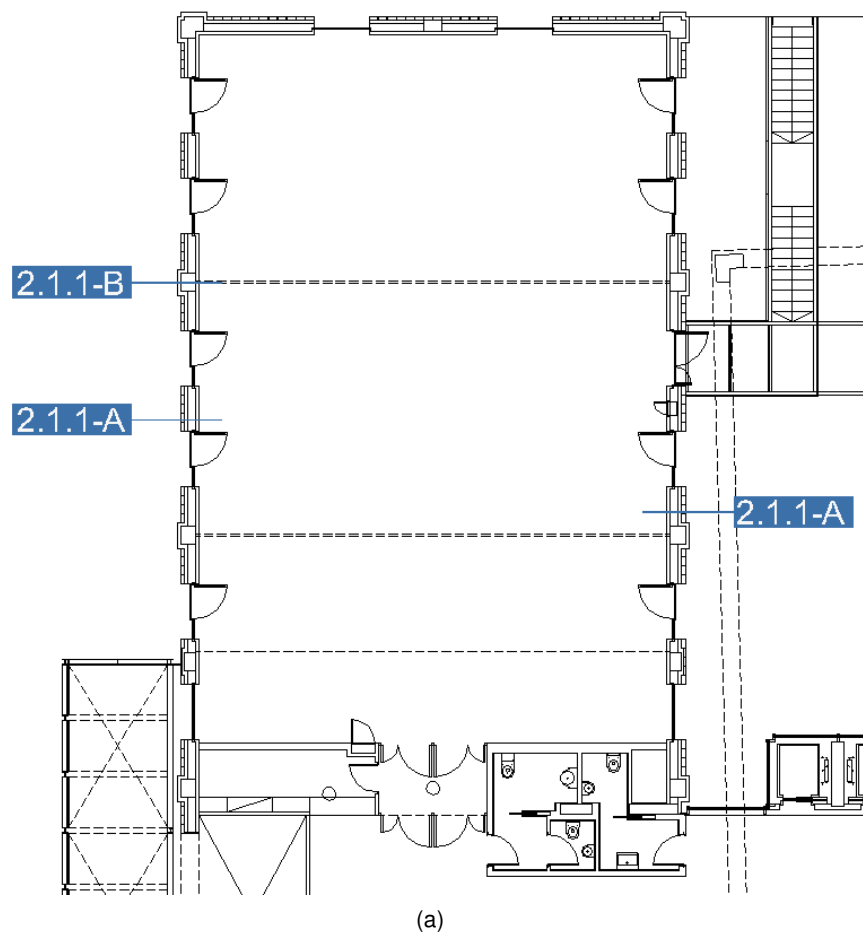
Fig.7.4 – Dettaglio di un modulo di cemento.

La parete del palcoscenico, essendo immediatamente al lato delle scene, è il luogo con la principale influenza sulle prime riflessioni laterali - almeno riferendosi ai posti anteriori - responsabile della maggior parte dell'immagine spaziale in direzione orizzontale. Fondamentale anche in questo caso risulta essere allora la scelta del materiale che dovrebbe essere molto riflettente per sfruttare al meglio le peculiarità di questo elemento architettonico. Nel nostro caso, per ragioni estetiche ed architettoniche, si è dovuto scegliere il cartongesso, tuttavia eventuali bonifiche e migliorie successive potranno considerare modifiche all'attuale assetto e optare per materiali ben più adatti ai nostri scopi. Una scelta più sensata, infatti, sarebbe stata per esempio il metallo, o il legno verniciato che sono materiali acusticamente molto riflettenti.

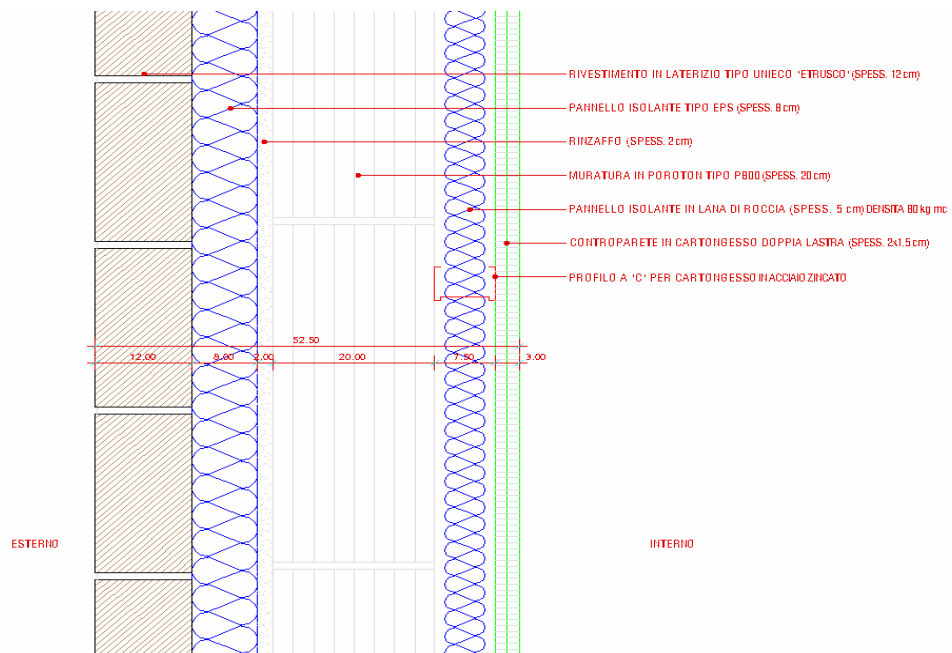
Dai rilievi esecutivi si evince che le pareti esterne in progetto per l'Auditorium hanno la conformazione rappresentata nello schema in figura 7.5, dove è visibile la pianta e la loro struttura. Le pareti esterne comprendono un primo strato di circa 3 cm di materiale isolante, una controparete costituita da una doppia lastra di cartongesso, accoppiata con una massa fonoisolante della larghezza di 5 cm, nello specifico lana di roccia a media densità. All'interno 20 cm di muratura di laterizio poroton assicurano l'isolamento termico e acustico voluto. L'attenuazione dei rumori aerei si ottiene interponendo un diaframma dotato di massa. La struttura porizzata poi, ha un effetto di smorzamento che aumenta ancora di più la caratteristica d'isolamento acustico.

L'assorbimento risulterà generalmente elevato alle frequenze medie e medio-alte, l'utilizzo di uno spessore sufficientemente elevato di materiale, ossia il montaggio di lana di roccia e intercapedine di muratura poroton, consentirà di assorbire le basse frequenze in eccesso comportando un significativo smorzamento delle stesse. In profondità l'intonaco e l'isolante termico e ulteriormente, malta, isolante e laterizio.

Tra le due configurazioni 2.1.1-A e 2.1.1-B, dettagliate nella pagina seguente, la differenza del pilastro in calcestruzzo inserito nello scheletro della struttura.



(a)



Sezione orizzontale 2.1.1- A

(b)

L'ampia volta di copertura é costituita come nella rappresentazione seguente.

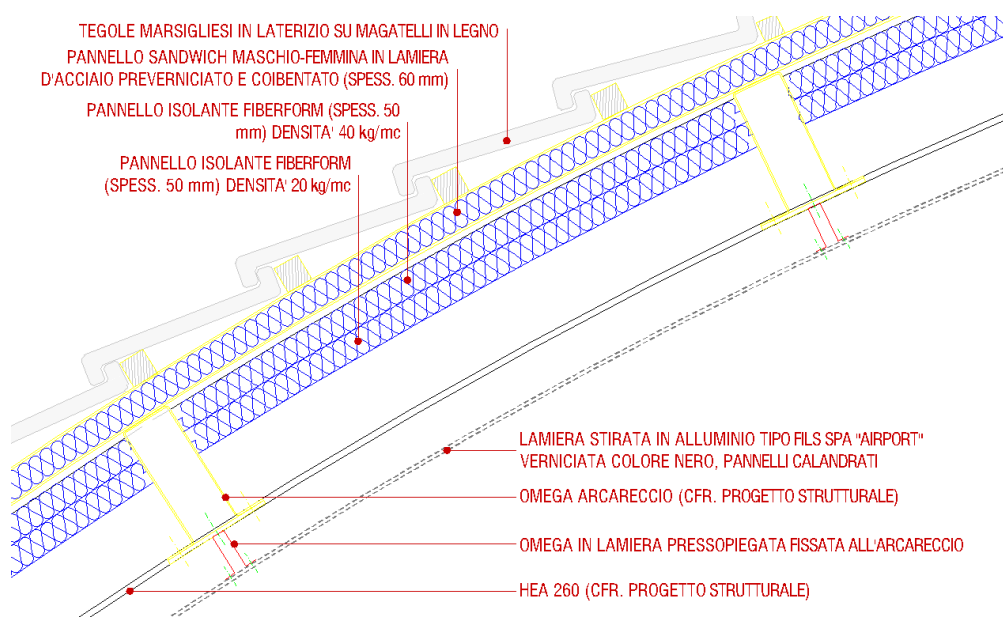


Fig. 7.6 –Sezione della volta.

7.1.5 LA SCELTA DEI MATERIALI

La scelta di massima delle caratteristiche acustico-estetiche dei materiali per il rivestimento della sala è stata operata in collaborazione con la committenza, gli architetti autori del progetto, i progettisti dell'impiantistica, l'installatore audio/video e gli architetti del nostro studio.

Sono inoltre state eseguite simulazioni con modello di calcolo in varie configurazioni di progetto, fino a definire la soluzione che rappresenta il miglior equilibrio tra esigenze funzionali e caratteristiche acustiche.

Le caratteristiche e i materiali prescelti sono stati i seguenti:

- *controsoffitto*: la forma del controsoffitto, una grande volta, è di difficile bonifica dal momento che le distorsioni del suono dovute alle focalizzazioni e alle onde stazionarie tra soffitto e pavimento, creano echi e riverberi indesiderati. Pertanto è stato adottato un ottimo materiale fonoassorbente di copertura, nello specifico fiberform 62T.

Pannelli semicilindrici inclinati sospesi sotto la volta per assicurare una maggiore diffusione dei raggi sonori sulla platea, sono stati limitati numericamente per esigenze estetiche ed architettoniche.

- *pareti laterali*: oltre al pacchetto murario normale (rivestimento mattoni facciavista di 12 cm, isolante termico di 8 cm, rinforzo di 2 cm, blocco in poroton di 20 cm di) è stato previsto anche un placcaggio fonoisolante composto da una doppia lastra fonoisolante di cartongesso montata a ridosso di materassini di fiberform, con densità 40 kg/m² e spessore 5 cm

A ridosso del cartongesso sono collocati i prismi a base semi triangolare mobili con le tre facce di materiale rispettivamente assorbente, riflettente e diffondente, (per esempio fiberform, legno e pannelli corrugati tipo flutterfree).

- *parete di fondo o scenica*: per esigenze estetiche, architettoniche e progettuali il rivestimento esterno avrà la struttura 2.1.1-A. Si potranno eventualmente prevedere migliorie in fase di taratura con l'inserimento di materiale assorbente e/o diffondente.
- *Parete di ingresso*: per esigenze estetiche, architettoniche e progettuali il rivestimento esterno prevedrà doppia lastra di cartongesso.
- *pavimento*: per motivi di manutenzione e di durata dovrà essere di cemento, verrà ricoperto solo dal palco e dagli spettatori.
- *palcoscenico*: in base all'evento in programma, l'eventuale palco in uso potrà essere collocato al fondo sala o in posizione centrale e sarà preferibilmente composto da praticabili in legno.
- *pedane*: fiberform nella parte sottostante e legno verniciato sul lato d'appoggio del musicista, per contenere le riflessioni della sorgente in pedana. Le pedane chiuse, invece eserciteranno un adeguato potere assorbente.
- *porte*: dovranno possedere un adeguato potere fonoisolante (>41.0 dB) e ricoperte in legno.
- *finestre*: vetro.
- *regia*: sviluppata in lunghezza sul lato d'ingresso, sarà costituita dal parapetto e pavimento in cemento, con parete di fondo in cartongesso.

La seguente vista prospettica della sala arredata indicano l'esatta collocazione di tutti i materiali, così come sono stati progettati ed inseriti nel modello previsionale.

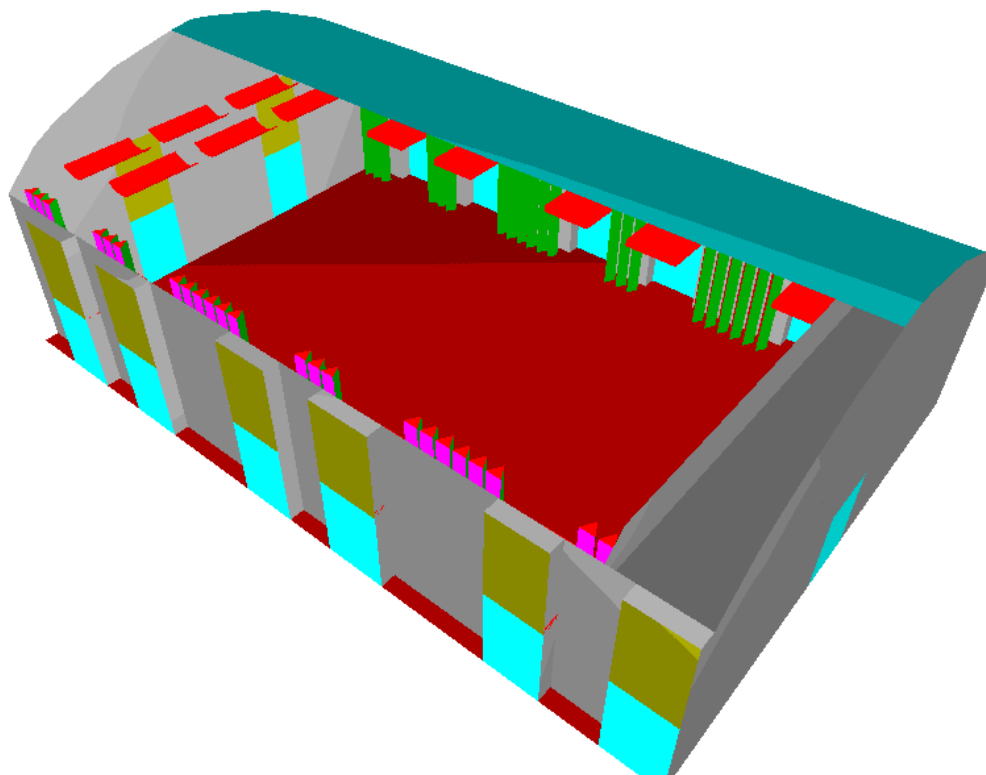


Fig. 7.7 – Vista prospettica della sala arredata come nel modello di calcolo.

Sono riconoscibili gli pannelli acustici triangolari in flutterfree (viola), legno verniciato (rosso) e fiberform (verde), il parapetto della regia, oltre ai pannelli concavi di legno sospesi.

Ad ogni materiale sono state assegnate le caratteristiche di fonoassorbimento tipiche dei materiali di cui sono composti. La bonifica acustica interverrà quindi necessariamente sul soffitto e sulle pareti laterali.

7.1.6 ALLESTIMENTI

Pannelli di controsoffitto e riflessioni dall'alto

Si deve studiare la morfologia del soffitto al di sopra dei musicisti. E' importante mantenere equilibrato il suono fra le diverse componenti dell'orchestra e si deve garantire l'assieme che corrisponde alla capacità di poter iniziare e terminare all'unisono: i musicisti non solo devono sentire il proprio suono ma anche quello emesso dallo strumento dei propri colleghi. L'ensemble è funzione della vivezza e del calore del suono.

Un altro elemento fondamentale legato al soffitto è rappresentato dai pannelli di controsoffitto che giocano un ruolo primario nelle prime riflessioni che giungono a tutto l'auditorio. Anche per quest'elemento architettonico-acustico si sono rivelati necessari più tentativi; la funzione che svolge questo elemento è infatti delicata e prevalente su molti altri, abbisogna quindi di un'accurata messa a punto. Le riflessioni che derivano da questo elemento devono raggiungere ogni spettatore, va quindi calcolato il profilo in sezione e l'inclinazione di ogni singolo tratto affinché la traiettoria dei raggi sonori sia corretta e riesca ad essere indirizzata. Queste riflessioni vanno sfruttate per migliorare l'indice di chiarezza e di conseguenza bisogna calcolare la differenza di percorso compiuto tra il raggio del suono diretto e quello riflesso. L'importanza di questo elemento acustico risiede inoltre nel fatto di allargare l'immagine spaziale, questa volta non più in orizzontale ma in verticale regalando l'impressione che sia presente un'ulteriore sorgente virtuale posta in alto. Dapprima si era pensato a questo elemento architettonico come un diaframma continuo in legno ma si sono verificati vari problemi. Uno di questi era legato alla lunghissima coda sonora che veniva a crearsi, dovuto, molto probabilmente, alle riflessioni che venivano ad instaurarsi nel relativamente piccolo volume tra il soffitto, la parete scenica e questo elemento.

La soluzione di questo problema si è ottenuta suddividendo questo elemento in numerose parti, come fosse una batteria di singoli pannelli riflettenti, questo impediva che il riverbero venisse intrappolato nello spazio creatosi precedentemente. Un pannello parzialmente aperto che continua oltre la sede delle sorgenti e copre le prime file del pubblico può rappresentare, in linea del tutto generale, un buon sistema.

I pannelli riflettenti possono essere gestiti in base al tipo di rappresentazione, è in progetto un sistema di sollevamento che ne rende opzionale la messa in funzione. Vedremo nei calcoli eseguiti come la posizione dei pannelli estesa su tutto il soffitto migliora in certe configurazioni i valori di alcuni dei parametri acustici.

Il palcoscenico mobile

I benefici acustici legati alle limitate dimensioni non devono essere vanificati realizzando un retropalco di dimensioni tali da dissipare buona parte dell'energia sonora prima che questa raggiunga gli spettatori; il volume della scena dovrebbe essere il minimo necessario.

Il palco per l'orchestra deve avere il piano di calpestio in legno non verniciato di media durezza e leggermente inclinato, in contropendenza rispetto alla platea. L'altezza del palco rispetto alla platea deve aggirarsi sui 30 - 40 cm sopra un'intercapedine d'aria, a formare una trappola per i bassi. Il palco mobile può sparire o raggiungere il centro sala secondo l'utilizzo.

Nel caso concerti di musica classica o acustici, si consiglia di aggiungere rivestimenti del retropalco realizzati con massicci pannelli di legno opportunamente orientati verso la platea e lavorati in modo da restituire un campo sonoro diffuso.

Le sedute scomparse

Le sedute sono pensate mobili, non fisse d'accordo con la flessibilità della sala in termini di utilizzo. Sono infatti presi in considerazione casi in cui l'evento musicale o parlato verranno fruiti in piedi.

Moduli prismatici

Il metodo scelto per gestire l'area d'assorbimento equivalente delle pareti, elemento fondamentale per il preciso controllo del tempo di riverbero e per variare l'assetto acustico della sala della modalità musica a quella parlato, è stata l'introduzione di elementi ad acustica variabile in punti strategici della parete, i prismi rotanti attorno a un perno centrale. La scelta dei materiali è stata fatta in base alle caratteristiche assorbenti, riflettenti e diffondenti che ciascun lato doveva apportare.

7.1.7 STUDIO PREVISIONALE DEL CAMPO ACUSTICO ALL'INTERNO DELLA SALA

Per prima cosa si è studiato il problema da un punto di vista strettamente geometrico, analizzando la forma della sala.

L'Auditorium é rettangolare in pianta e sezione, esigenze progettuali hanno definito una conformazione di difficile bonifica acustica. Il pavimento piano e non discendente e la volta coprente con un'eccessiva distribuzione in altezza giustificano l'intervento con materiale fonoassorbente, in particolare nel soffitto, per ovviare ad echi e riverberi indesiderati. Questi vanno eliminati per aumentare sia la chiarezza del parlato sia la piacevolezza della musica.

Le due pareti laterali fra loro parallele sono mosse da prismi a base semi triangolare configurabili, offrendo un'acustica totalmente variabile alla sala. Un meccanismo rotante permetterà ai pannelli di assumere la posizione voluta, esponendo il lato assorbente, riflettente o diffondente in base agli scopi per cui è intesa la sala. In questo modo l'acustica della sala viene modulata in base alla loro posizione. E' anche la studiata movimentazione delle pareti a permettere di evitare dannosi echi o risonanze.

L'elaborazione grafica che segue offre una vista interna concettuale del progetto esecutivo realizzato.

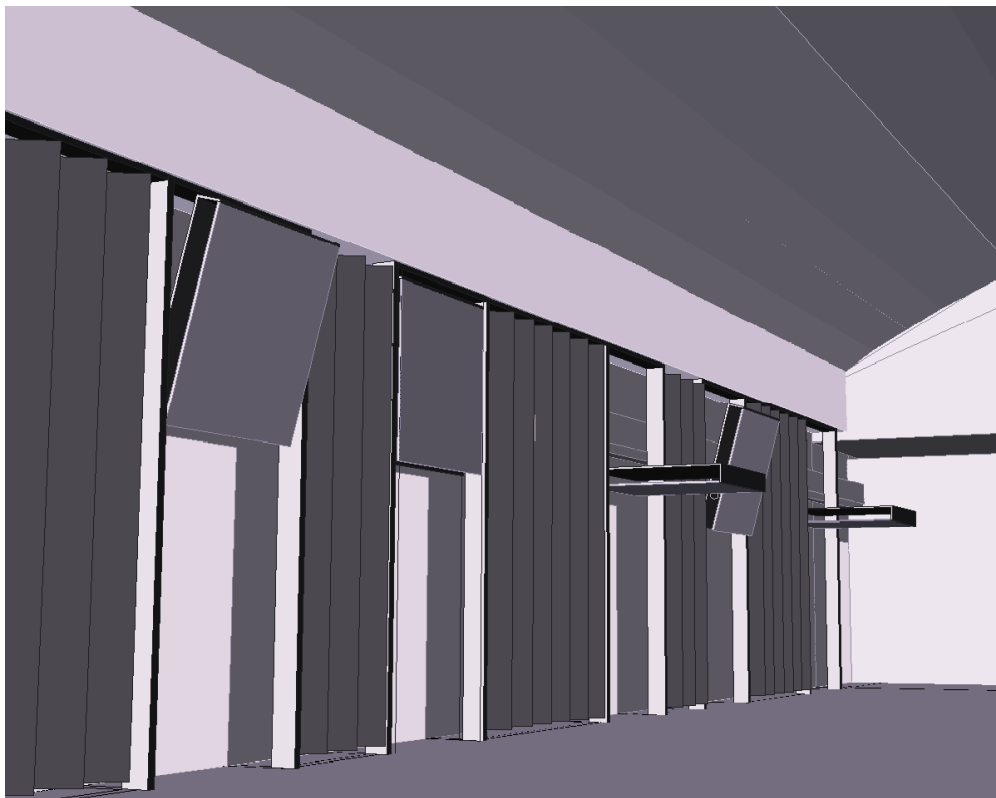


Fig.7.8. Immagine descrittiva dell'interno dell'Auditorium, dettaglio delle pedane.

7.1.7.1 TARATURA DEL MODELLO DI CALCOLO

E' stato realizzato un modello geometrico tridimensionale della sala esistente, nel quale sono stati inseriti tutti i principali elementi geometrici (pavimento, pareti, soffitto, aperture...).

Come accennato in precedenza, è necessario tarare il modello di calcolo con un processo iterante di correzione d'errore per giungere a un modello definitivo sul quale fare le dovute analisi. Sono mantenuti i materiali decisi in fase progettuale, si sono scelti quelli relativi agli elementi accessori. Gli obiettivi iniziali sono raggiungere un buon livello di riverbero : l'ideale sarebbe ottenere un valore tipico per la musica per poi poterlo adattare al parlato, dato che l'operazione inversa è spesso difficoltosa. Sarebbe dunque importante conseguire una buona escursione nelle caratteristiche di variabilità acustica. Partendo dalla geometria considerata, tale messa a punto è fatta in base ai materiali e agli allestimenti.

Per indagare la situazione iniziale si è inserita la geometria illustrata in figura, considerando la sala spoglia, con gli elementi base, di cui è visibile sia l'interno sia l'esterno della struttura.

In questo modo si possono avere informazioni sul tempo di riverberazione e la risposta all'impulso.

La figura che segue mostra il modello definitivo.

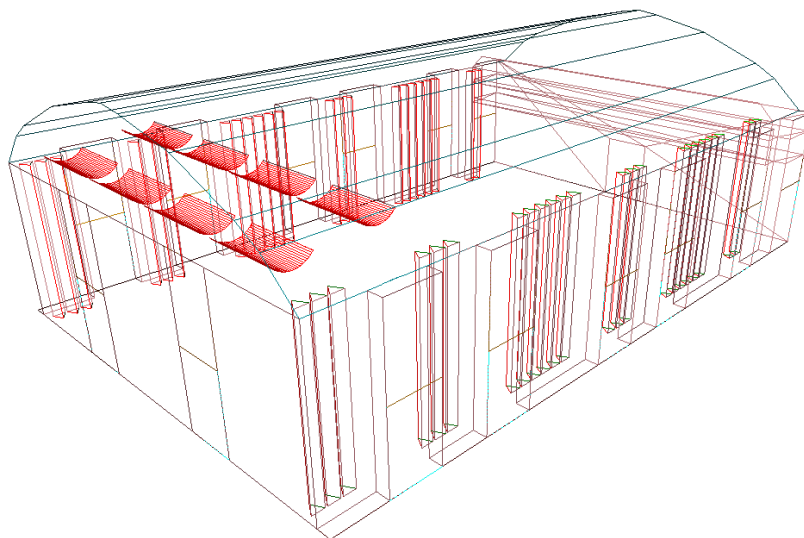


Fig. 7.9. - Configurazione di progetto: vista assonometria.

Nell'immagine seguente riportiamo una vista 3D del modello geometrico, in cui è visibile l'interno dell'Auditorium, provvisto di finestre e pannelli a base semi-triangolare capaci di rotare per modificare le qualità acustiche e riverberanti della sala, adattabili alle diverse situazioni d'utilizzo. In figura sono altresì visibili pannelli convessi diffondenti situati al di sopra di un' ipotetico palco a fondo sala con lo scopo di aumentare la superficie di incidenza delle riflessioni sulla platea. Vedremo l'analisi della distribuzione dei pannelli in tutta la lunghezza della sala in grado di aumentare la diffusione sonora nel fondo, a causa dell'ampia volta.

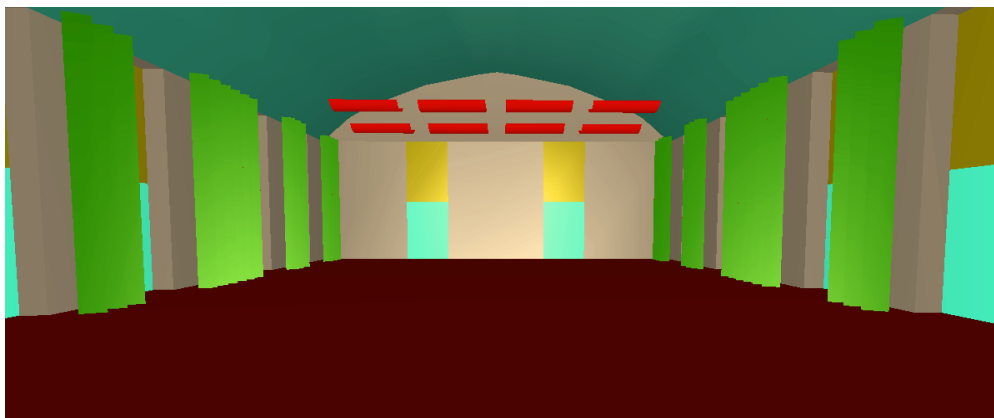


Fig. 7.10 - Vista 3D dall'ingresso con le pedane chiuse.

Nell'immagine seguente le pedane a scomparsa per ospitare le sorgenti sonore laterali, è inoltre raffigurato il dettaglio dei moduli rotanti e della regia.

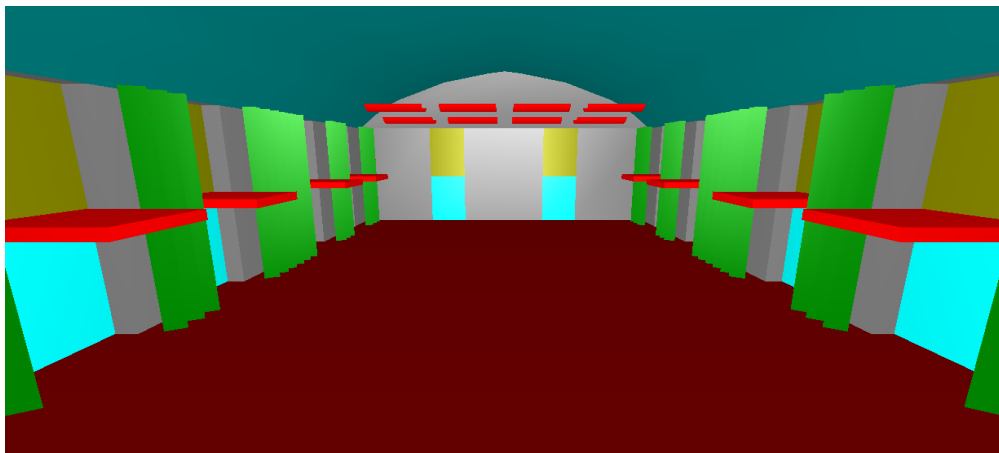


Fig.7.11 - Vista 3D dall'ingresso con le pedane aperte.

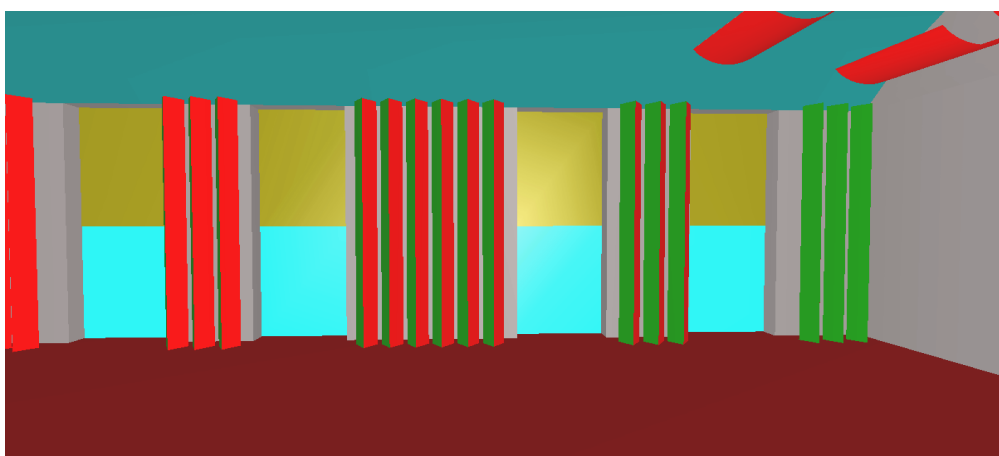


Fig.7.12 - Vista 3D dell'interno.

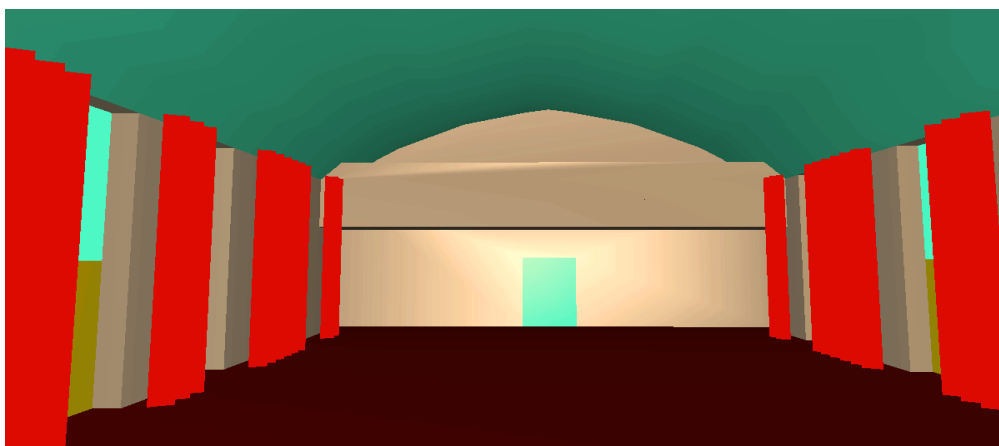


Fig.7.13. - Vista 3D dal palco con vista del parapetto della regia.

Il modello di calcolo è stato utilizzato con i seguenti parametri di configurazione:

Parametri di calcolo	
Level	8
Time	5 [s]
Precision	0.01 [s]
History	Time dependent
Humidity	50 %
Temperature	20 [°C]
SoundSpeed	343.294411 [m/s]
Diffusion	On
Randomize after	4

Tab.7.1. – Parametri di configurazione nel calcolo acustico.

Come si osserva dai dati sopra riportati, è stato utilizzato un livello di precisione di calcolo abbastanza elevato, dal momento che, da ogni sorgente puntiforme, vengono sparati 2048 fasci piramidali, (level=8, $8 \times 2^8 = 2048$). Il tempo di corsa dei raggi è stato esteso fino a 5 secondi (time=5 s), e quindi oltre il tempo di riverbero dell'ambiente. Per quanto riguarda l'utilizzo dei coefficienti di scattering, questa opzione è stata attivata (Diffusion=On) in modo da tenere conto anche dell'effetto di diffusione.

In un secondo momento i parametri di configurazione sono stati aggiornati a un livello di precisione più elevato (livello 10, time 3, precision 0.001).

La sorgente posta su un ipotetico palco a fondo scena, si rivolge a 10 ricettori coprenti l'area della sala.

Nei calcoli i materiali base utilizzati sono quelli descritti nel paragrafo precedente, accordati dall'architetto autore del progetto, dalla committenza e ovviamente dal budget.

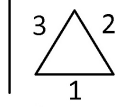
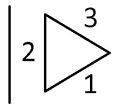
Vengono riportate le caratteristiche acustiche dei vari materiali prescelti nella simulazione, così come sono state fornite dalle ditte ed inserite nel modello numerico:

Coefficienti di fonoassorbimento										
Hz	31.5	63	125	250	500	1 k	2 k	4 k	8 k	16 k
Fiberform 62T-100mm ,30 Kg/mc	0.265	0.304	0.395	0.648	0.747	0.698	0.685	0.728	0.716	0.716
Cartongesso	0.182	0.182	0.139	0.085	0.048	0.029	0.048	0.067	0.085	0.085
Cemento	0.010	0.010	0.010	0.030	0.050	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
Legno verniciato	0.060	0.110	0.110	0.120	0.120	0.120	0.100	0.100	0.100	0.120
Legno di pino (porta e palco)	0.050	0.100	0.100	0.100	0.100	0.090	0.100	0.120	0.300	0.360
Lastra di vetro	0.140	0.270	0.180	0.060	0.040	0.030	0.020	0.020	0.020	0.020
Flutterfree	0.210	0.210	0.210	0.220	0.280	0.200	0.200	0.200	0.250	0.250

Tab.7.2 - Caratteristiche acustiche dei vari materiali prescelti nella simulazione.

Sono stati analizzati tutti i possibili casi di studio, per tutte le possibili movimentazioni dei prismi e degli allestimenti (il palco può essere presente o meno, a fondo scena o centrale, i pannelli a soffitto possono coprire tutto il soffitto, solo il palcoscenico o scomparire).

I due casi di massima escursione sono stati identificati come nella tabella seguente.

Configurazione	Prismi	Pannelli concavi	Palco	Pedane
TR massimo		Presenti in tutto il soffitto	Non Presente	Aperte
TR minimo		Non presenti	Non presente	Chiuse

Tab 7.3. - Configurazioni estreme della sala in oggetto in dove 1. Flutterfree, 2.Legno verniciato, 3.Fiberform.

Tempi di riverbero minimi e massimi

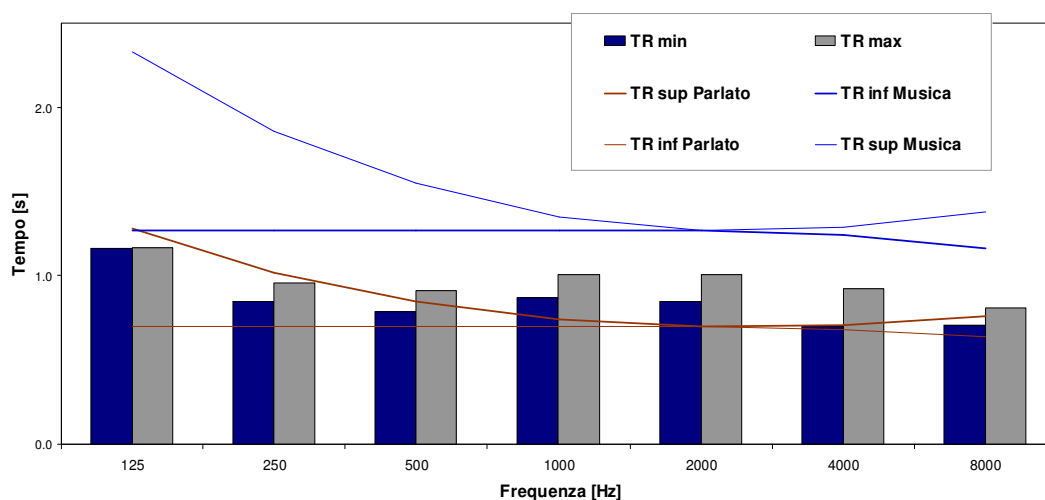


Fig 7.14 – Tempi di riverbero: confronto fra massimo e minimo ottimi e valori della sala.

Da questo grafico vediamo la riverberazione in secondi ad ogni frequenza. Importante per valutare il T20 è considerare il TR a 1000 Hz, ma la curva in complesso ci descrive come si comporta il decadimento sonoro a tutte le frequenze.

Come si può notare, c'è una piccola escursione nei valori del tempo di riverbero. La configurazione dei prismi mobili è stata scelta esponendo il lato più riflettente in un caso, e maggiormente assorbente nell'altro. In quest'ultimo caso scambiando flutterfree con il legno verniciato il valore del tempo di riverbero decresce solo leggermente nelle alte e basse frequenze. Inoltre nelle frequenze medie alte la curva manca di linearità.

Nello scenario di progetto il tempo di riverbero con la sala arredata dai materiali è molto vicino all'area ottima per la fruizione come teatro di posa o auditorium. Si può notare come i valori

rimangono ben al di sotto dei valori tipici delle sale da concerto per eventi quali musica classica, leggera o amplificata, la quale necessita quindi di un rinforzo sonoro, tanto più se si pensa ad un pubblico presente in sala. Vedremo come sarà necessario intervenire nell'allestimento scenico in maniera adeguata, migliorando gli elementi a disposizione presenti e aggiungendone di nuovi.

Per quanto riguarda le frequenze basse, è noto come gli algoritmi di simulazione tendano a sovrastimare il tempo di riverbero, che nella pratica risulta più breve per effetto di irregolarità geometriche e dispersioni che inevitabilmente si verificano e che non possono essere previste in fase di realizzazione del modello. Viceversa, alle alte frequenze (sopra i 4000 Hz) i rivestimenti in legno (o i tessuti) presenti in sala tendono ad accorciare il tempo di riverbero, e questo effetto è generalmente valutato dal software di simulazione.

Dall'elaborazione con Ramsete è interessante notare come la risposta all'impulso abbia un andamento abbastanza lineare, di breve durata, (1,25 sec), con qualche eco nella coda finale.

La presenza di echi è dovuta all'assenza di allestimenti e di persone. Naturalmente gli echi andranno eliminati per aumentare sia la chiarezza del parlato sia la piacevolezza della musica.

Sono inoltre stati simulati vari casi per analizzare il comportamento del fiberform a soffitto nei risultati della simulazione: optando per un materiale meno assorbente, aumenta ovviamente il valore del tempo di riverbero, ma l'effetto della variabilità acustica degli elementi a parete rimane contenuto. Ciò significa che sarà necessario adottare ulteriori accorgimenti nel trattamento degli elementi a soffitto, oltre a un' adeguato intervento della parete scenica e del pavimento.

7.2 ANALISI E RISULTATI

Sono di seguito elencati i risultati dello studio e delle analisi acustiche svolte per la sala in oggetto.

7.2.1 CASI DI STUDIO

Sulla base delle considerazioni fatte, sono state individuate delle configurazioni di rilievo, e sono state eseguite le simulazioni con il modello di calcolo in tutte le configurazioni possibili di progetto, a sala vuota.

I casi di studio sono differenziati in base alla posizione del palco e dei pannelli concavi a sospensione, all'apertura o chiusura delle pedane e all'evento proposto, e quindi alla posizione dei prismi configurabili a ridosso della pareti laterali. Di seguito sono riportate le conclusioni tratte dalla simulazione e dall'analisi dei risultati più significativi ottenuti per ogni singola configurazione. In particolare nelle prime quattro configurazioni si studia l'effetto nei parametri acustici dei pannelli a soffitto, nelle configurazioni 5 e 6 sono considerati l'evento musicale e il parlato. Inoltre per un'analisi approfondita sono stati considerate tutte le più interessanti movimentazioni delle strutture mobili a ridosso delle pareti laterali. Sono possibili, infatti, anche configurazioni miste (lati esposti sia in modo riflettente che diffondente o assorbente) secondo lo scopo che si vuole raggiungere dal punto di vista acustico. Da notare che il rivestimento di appoggio delle pedane deve essere dichiarato *obstructing* nel modello di calcolo, in quanto ostacoli tra sorgente e ascoltatore.

Configurazione	Soffitto	Pareti scenica	Pavimento	Pannelli concavi	Palco	Pedane
1	Fiberform	Cartongesso	Cemento	Presenti sul palco	Non presente	Aperte
2	Fiberform	Cartongesso	Cemento	Presenti sul palco	Non presente	Chiuse
3	Fiberform	Cartongesso	Cemento	Presenti in tutto il soffitto	Non presente	Aperte
4	Fiberform	Cartongesso	Cemento	Presenti in tutto il soffitto	Non presente	Chiuse
5 Evento non amplificato musica acustica (pr=0.001, Time = 3 s, level 10)	Fiberform	Cartongesso	Cemento	Presenti sul palco	Presente nella parete fondo/centrale	Aperte /Chiuse
6 Evento amplificato cinema, ambisonic, convegno (pr=0.001, Time = 3 s, level 10)	Fiberform	Cartongesso	Cemento	Non Presenti sul palco	Non Presente	Aperte /Chiuse

Tab.7.4 – Casi di studio analizzati per l'Auditorium.

Configurazione	Triangoli
A, B, C	
D, E, F	
G, H, I, J	
L, M, N	

Tab 7.5 - Posizioni dei prismi nell'analisi: 1. Flutterfree, 2.Legno verniciato, 3.Fiberform.

Come notato in precedenza, è necessario dividere l'analisi tra evento musicale e parlato: nel primo caso sono importanti i parametri di spazialità e di diffusione sonora, nel secondo caso saranno fondamentali gli indici di intelligibilità e chiarezza.

Osserviamo che sia nel caso dell'evento amplificato che non amplificato, (casi 5 e 6), i limiti di calcolo sono scelti più precisi per aumentare il dettaglio del tracciato, (level 10, time 3 sec, precision 0.001 sec).

La configurazione 5 prende in considerazione gli assetti tipici dell'evento acustico, che può considerare una diversa collocazione del palco in legno, centrale o tipicamente a fondo sala, e l'esposizione dei lati diffondente e riflettente dei prismi mobili. Sono state quindi considerate tutte le 3 possibili configurazioni per essi che considerino tale assetto, (J,G,H), oltre all'apertura o chiusura delle pedane a parete.

La configurazione 6 prende in considerazione l'assetto tipico dell'evento amplificato, in particolare parlato, che considera l'esposizione dei lato assorbente dei prismi mobili, (I), nel caso delle pedane aperte e chiuse.

Nell'analisi dei principali descrittori soggettivi, vale la pena soffermarsi su alcuni casi di particolare interesse. Le immagini che seguono riportano alcune mappe acustiche dell'Auditorium in cui sono evidenziati i principali parametri di valutazione oggettiva per alcuni casi in esame analizzati mediante il software di simulazione acustica.

Livello di pressione sonora

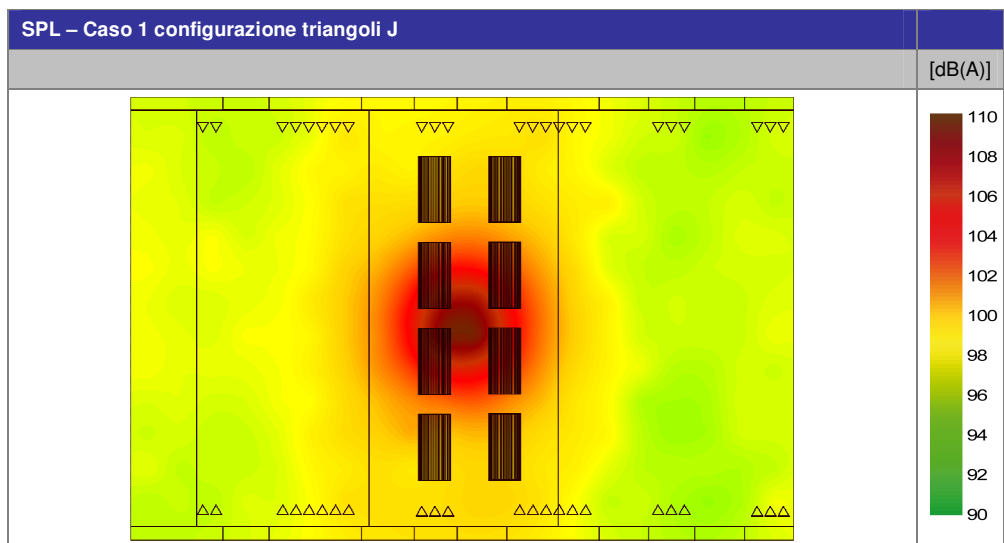
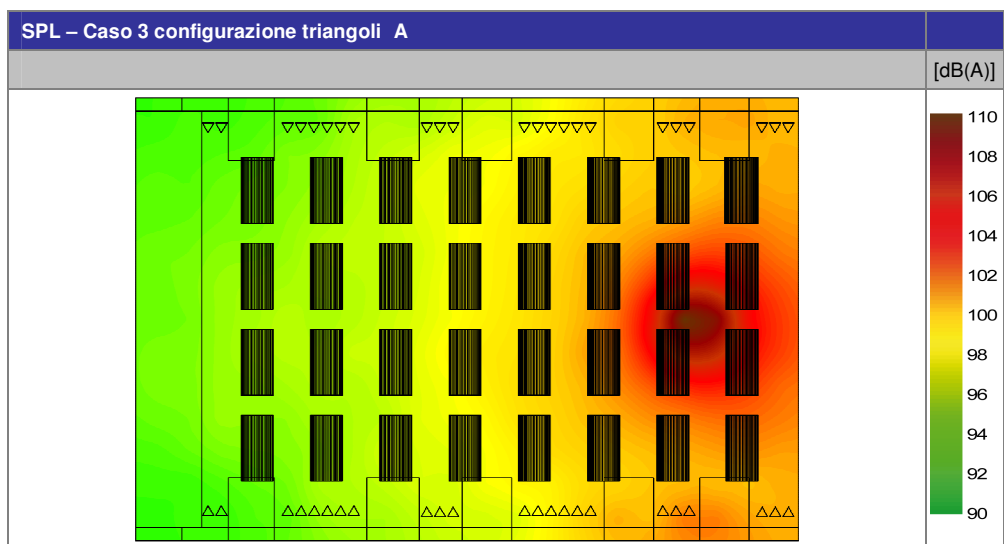
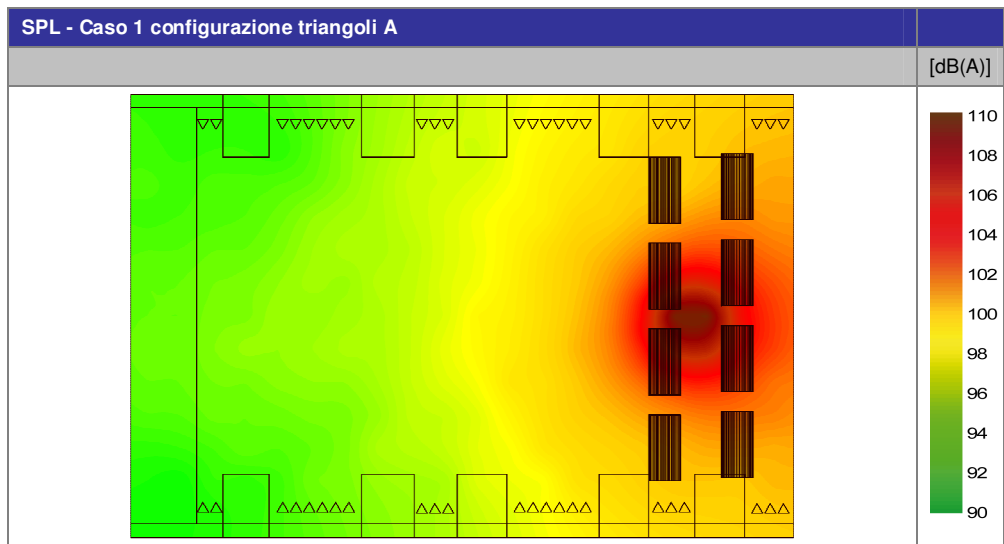
Il livello sonoro in ogni punto di una sala è funzione del livello del suono diretto, principalmente della distanza dal palco, e della *liveness* della sala in questione, cioè di quanto questa reagisce e sostiene il suono prodotto tramite il contributo del livello del suono riverberato. Questo secondo parametro tende a rendere omogenei i valori in ogni punto della sala (idealmente *non* è funzione della posizione in cui viene misurato), mentre il primo tende a differenziarli a sfavore dei posti più lontani. Una variazione di livello sonoro all'interno della sala è quindi inevitabile, a meno di non utilizzare sistemi d'amplificazione.

Il livello di pressione sonora SPL pesato A è in genere piuttosto uniforme su tutta la sala, se si escludono le primissime file in cui ovviamente la vicinanza con la sorgente determina valori più alti. Dal confronto delle mappe che seguono, la presenza di pannelli sospesi sopra un ipotetico palco favorisce un rinforzo sonoro solo nella parte dell'Auditorium più prossima alla sorgente, mentre i pannelli appesi su tutta l'area del soffitto distribuiscono il suono in maniera più diffusa al pubblico in sala e lo sostengono maggiormente a fondo sala. Il risultato è un suono rafforzato e distribuito più uniformemente in tutto l'ambiente.

Nel nostro caso si vede un decremento di circa 5 dB dal punto più prossimo al palco al fondo, ma effettivamente si riduce a 3 dB considerando i pannelli a tutto soffitto e solo le aree in cui sono presenti i sedili. È un risultato piuttosto buono.

Da notare che il Teatro La Scala di Milano – teatro dall'eccellenza indiscussa - ha un decremento effettivo di almeno 10 dB, anche se la sua area in pianta è molto superiore alla nostra e non è direttamente confrontabile.

Nel caso di palco centrale, ed esposizione dei lati riflettente e diffondente dei prismi, il valore del parametro è subisce una caduta massima di 2 dB.



Indice di intelligibilità del parlato STI

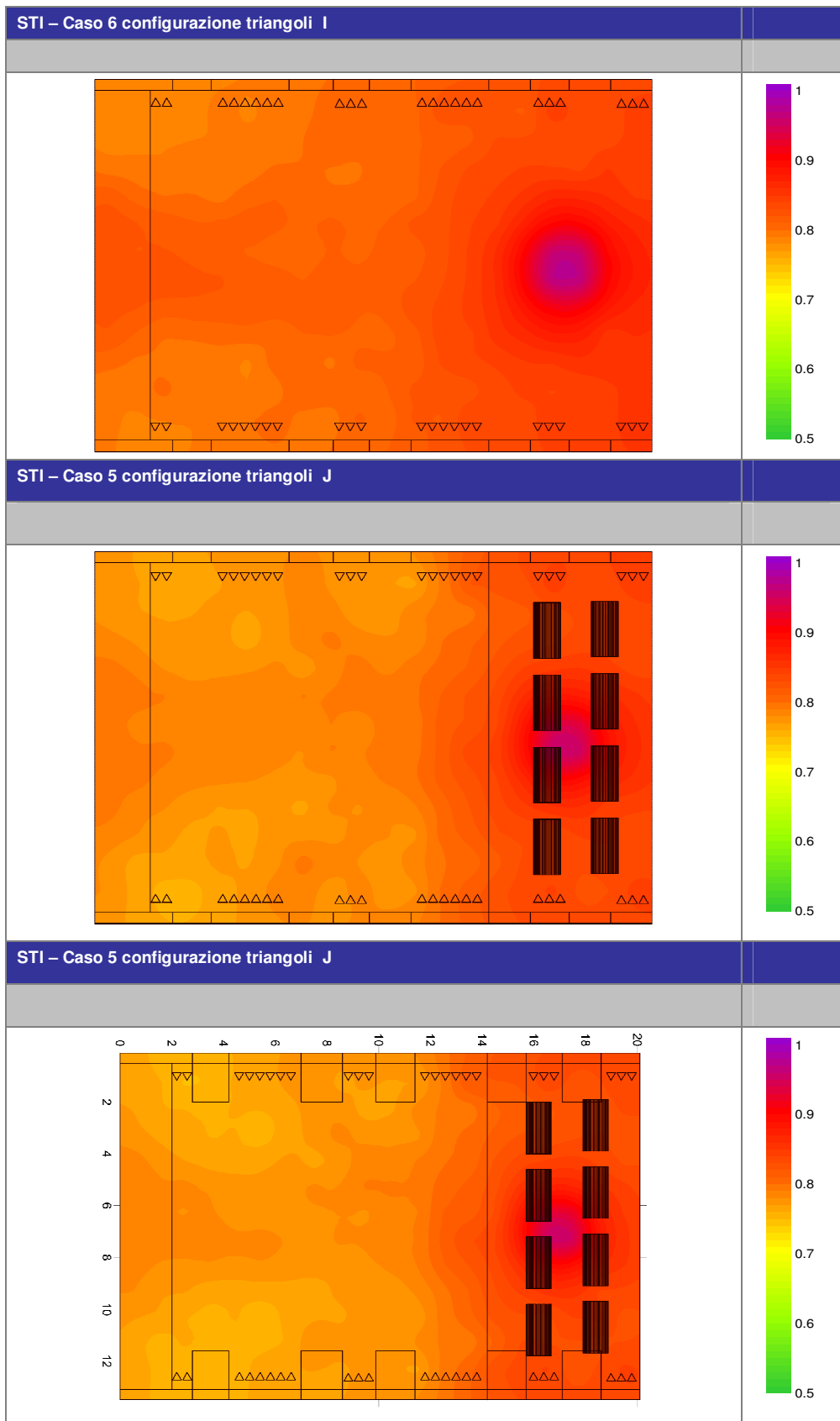
Un parametro appositamente studiato per misurare il grado di intelligibilità del parlato è, come si è visto, lo speech transmission index. Abbiamo mappato i valori previsti, considerando la sorgente omnidirezionale, ottenendo risultati confortanti. In generale lo STI infatti è ampiamente superiore a 0.7 in tutta la sala, ciò significa che anche senza impianto di amplificazione, si otterrà una buona qualità d'ascolto.

Nelle mappe che seguono è illustrato il confronto tra la configurazione con valori ottimi, cioè l'evento amplificato, (del tipo concerto, cinema, convegno, o ambisonic), che considera l'esposizione dei lato assorbente dei prismi mobili, con gli eventi rispettivamente non amplificato senza pedane (che considera legno e flutterfree per le i lati esposti) e quello con pedane. L'effetto delle pedane nel valore dello STI è in generale peggiorativo. Nel primo caso lo STI è molto buono, superiore a 0.8 in tutta la sala.

Da osservare che viceversa al livello equivalente, la configurazione con pannelli appesi sopra il palco appare più indicata per una migliore intelligibilità a fonda sala rispetto al caso dell'intera copertura a pannelli. Infatti a causa della copertura molto fonoassorbente, il tempo di riverbero è minore nel primo caso. Per gli eventi tipo conferenze, la situazione ottima è quella senza pannelli.

Anche la presenza del palco diminuisce i livelli già dalle seconde o terze file, per le riflessioni con la superficie sopraelevata in legno.

Un'altra configurazione con buoni valori di STI si otterrebbe collocando il palco centrale con i prismi rivolti con il lato assorbente e senza pedane aperte. Infatti, data la posizione centrale della voce, i valori di STI non hanno modo di sfumare a fondo sala dato il breve tragitto tra il palco e le ultime file.



Indici di chiarezza C50 e C80

Di seguito riportiamo i grafici degli Indici di Chiarezza C50 e C80; come già detto tali indici vengono utilizzati, quali parametri oggettivi, per il parlato e per la musica. Essi rappresentano l'intelligibilità del suono, sono parametri qualitativi e indicano con quanta definizione udiamo i suoni emessi.

Per il C80 e C50 i valori di riferimento sono per il parlato quelli maggiori o uguali a 3dB mentre per la musica compresi tra -4dB e 2dB¹.

Nella configurazione amplificata, tipica dell'evento parlato, il livello per il C50 a 1000 Hz è positivo e mediamente corrispondente a 3 dB in tutta la sala, e questo consentirà di poter apprezzare la corretta articolazione della parola. Da notare che in questo caso le pedane aumentano leggermente i valori di chiarezza.

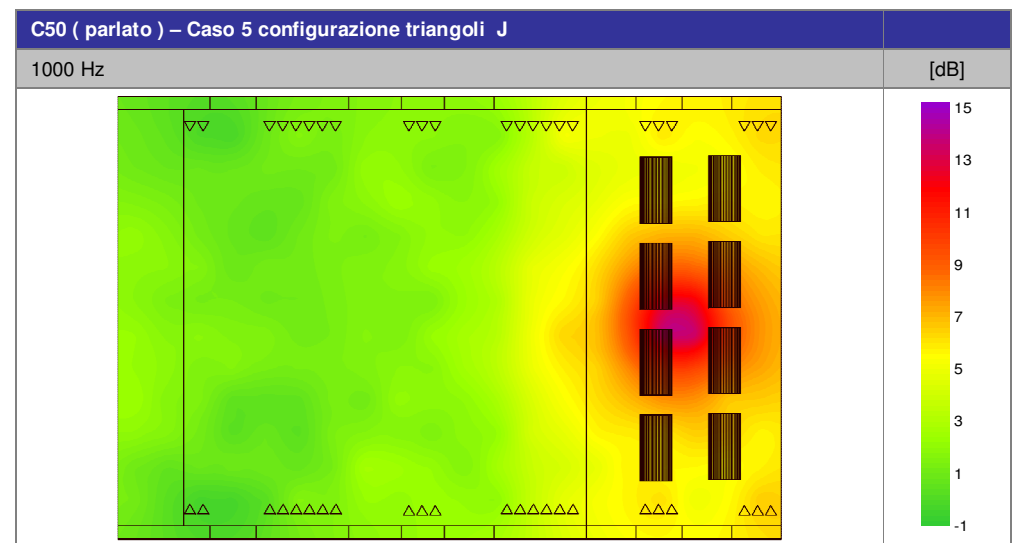
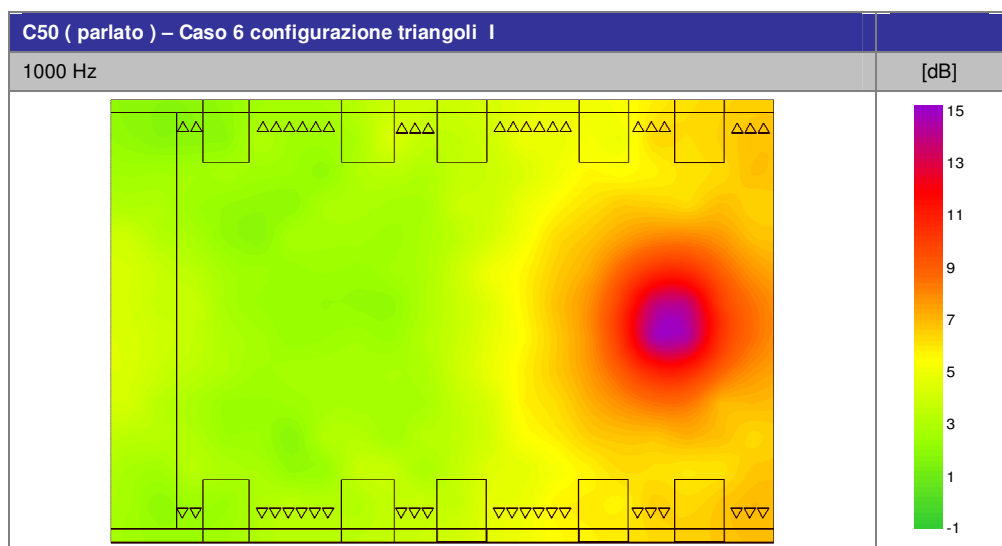
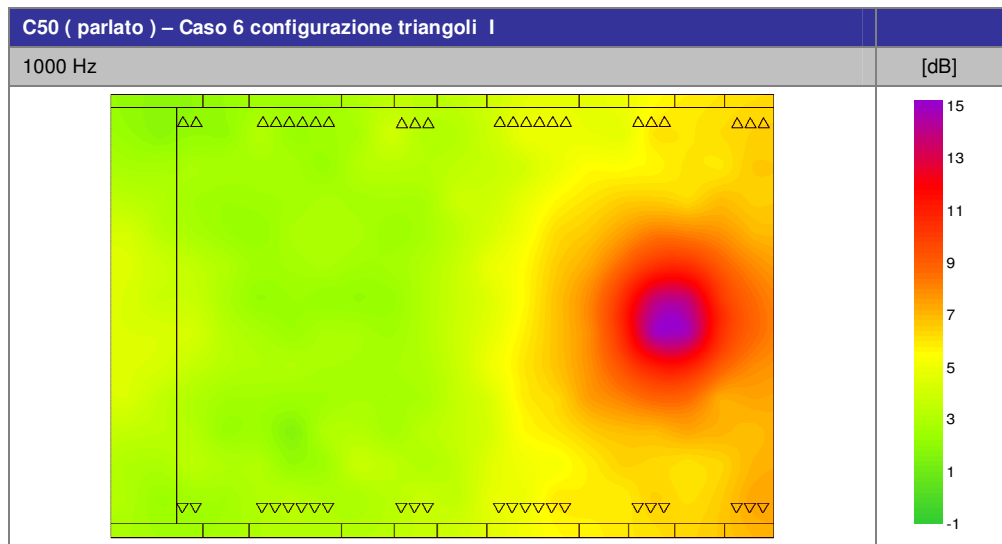
In letteratura vi sono diverse indicazioni per stabilire un intervallo tipico di bontà per questi descrittori, tuttavia in genere non esistono valori assoluti, essi sono funzione dei gusti personali, del tipo di rappresentazione e in sostanza del direttore artistico della struttura.

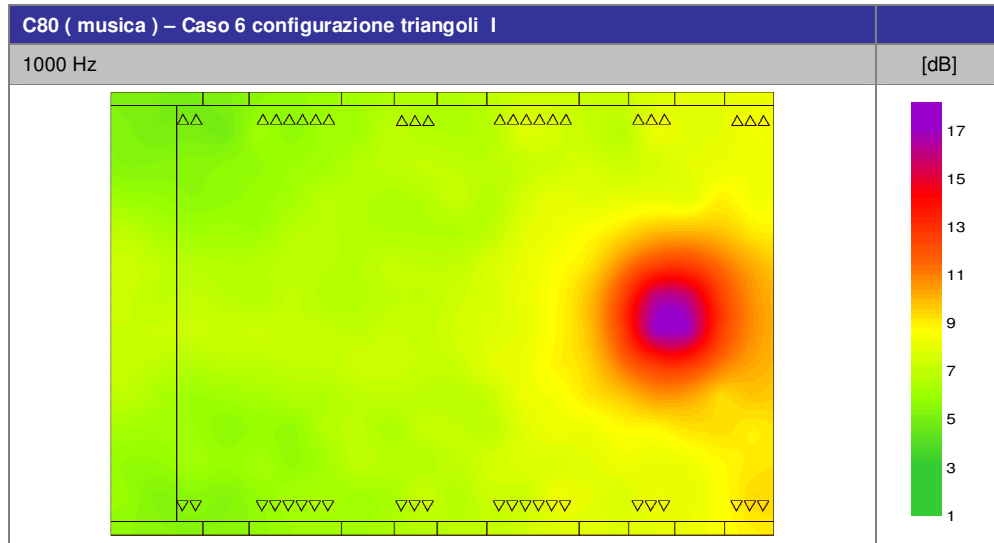
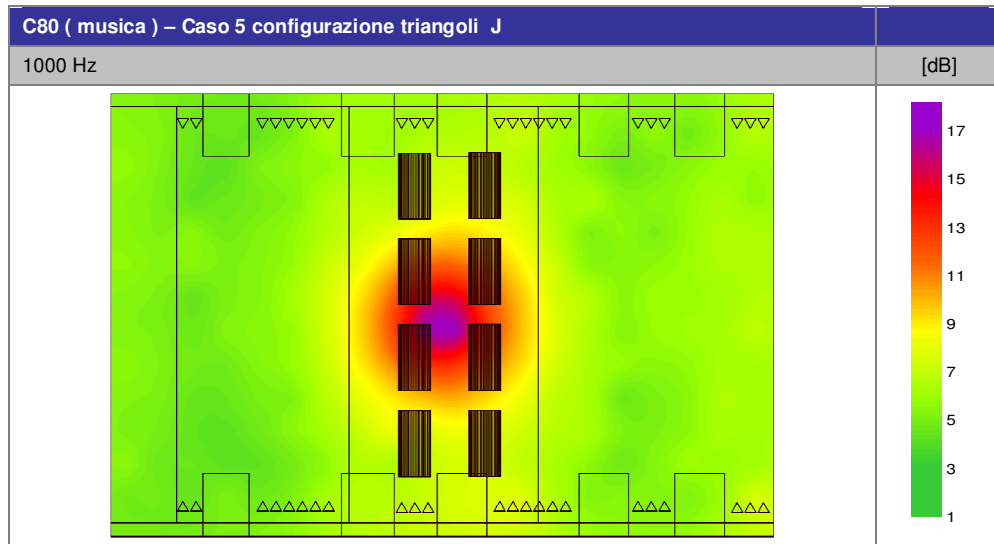
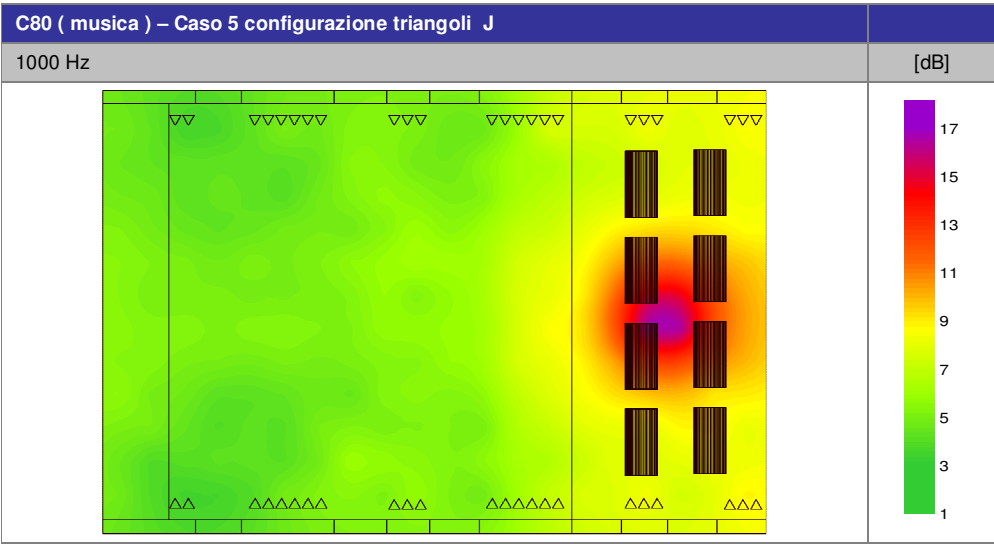
Un esempio si ha durante l'esecuzione di opere, in particolare nelle sale italiane si esige una chiarezza abbastanza alta, a differenza di quanto avviene nelle sale oltreoceano, dove la comprensione dei testi, per ovvi motivi linguistici, interessa meno. Un alto valore favorisce sicuramente quelle "sorgenti" che sono caratterizzate da alte frequenze, tra tutte, ad esempio, la voce umana e il violino, a cui siamo tradizionalmente molto affezionati. Inoltre durante le prove il direttore d'orchestra può preferire una maggior chiarezza per misurare la perfezione dell'esecuzione rispetto alla rappresentazione. In tal caso il C80 varia da +1 a +5.

Sulla base di queste considerazioni, nella configurazione non amplificata (5, concerto acustico) il C80 a 1000 Hz è ovunque positivo e mediamente uguale a 4 dB, un valore elevato ma che consentirà di poter apprezzare il messaggio musicale. Si nota inoltre una diminuzione nel valore di chiarezza C80 già dalle prime file d'ascolto, dove, ad ogni modo la distribuzione risulta uniforme. Nella configurazione dell'evento parlato, (caso 6), la rappresentazione dell'evento musicale sarebbe fin troppo chiara.

Di seguito le mappe relative agli indici di chiarezza C50 e C80.

¹ Renato Spagnolo, op. cit.,pg 745.





7.2.5 OSSERVAZIONI E MIGLIORIE

E' evidente che, nonostante la breve escursione della variabilità acustica ottenuta, i descrittori acustici principali relativi alle configurazioni analizzate sono confortanti. Preparando la sala nei due assetti considerati, musica e parlato, le caratteristiche di livello sonoro, chiarezza, intelligibilità giustificano la ragione delle scelte adottate in termini di materiali e forme per la sala in esame.

Tuttavia nell'analizzare le caratteristiche di diffusione del campo sonoro e della sensazione di spazialità sonora, otteniamo risultati interessanti, in particolare nello studio del descrittore lateral fraction.

Questo è un parametro di qualità ed indica la percentuale di energia riflessa rispetto all'energia totale, e contribuisce a rendere l'impressione spaziale. Un basso valore di lateral fraction farà percepire maggiormente il suono diretto, e la tridimensionalità acustica sarà penalizzata a discapito della "linearità" e della chiarezza, che sarà forse addirittura eccessiva. Una corretta proporzione fra energia globale e riflessa conferirà invece all'ambiente un campo sonoro avvolgente, ricco di sorgenti virtuali che contribuiscono a rendere un effetto sonoro spaziale.

E' stato eseguito il confronto tra la configurazione a minima diffusione, (individuata con G, prismi con lato esposto riflettente, e pedane chiuse) e quella a massima diffusione, (individuata con L, fiberform e flutterfree esposto, e pedane aperte). Si nota che i valori di LF dalla configurazione più diffusa a quella meno diffusa non hanno una grande escursione e rimangono abbastanza scarsi.

E' stato dimostrato² che questo parametro dipende fortemente dalla geometria della sala, infatti tale comportamento è da inficiare in gran parte alla forma del soffitto a volta.

Bonifica del soffitto

I difetti acustici legati alla forma della sala sono quelli inerenti alla focalizzazione del suono, alla presenza dei cosiddetti punti sordi, cioè con livelli di pressione sonora sensibilmente più bassi del valor medio, e alla possibilità che si instaurino fenomeni di eco. Alcune forme delle pareti di confine della sala conducono a concentrazioni localizzate di energia sonora, per contro altri punti non ricevono abbastanza energia riflessa e il livello sonoro diviene insufficiente. Per ridurre tali fenomeni occorre evitare quanto più possibile le superfici concave.

Se una superficie di questo tipo è preesistente nell'ambiente, un possibile rimedio da utilizzare consiste nel cercare di movimentare la superficie concava con un opportuno rivestimento, in modo da impedire la concentrazione del suono. In questi casi può essere utile l'impiego di un rivestimento di materiale fonoassorbente opportunamente sagomato.

Si suggerisce pertanto di trattare adeguatamente il soffitto e di inserire un numero maggiore di piani inclinati sospesi sotto la volta, previsti con una leggera curvatura, per assicurare una maggiore diffusione dei raggi sonori sulla platea. Per limitare gli effetti dell'ampia cavità formata dalla volta, dunque, possono essere un ulteriore accorgimento l'inserimento di pannelli fonoassorbenti e baffles sospesi su vie di corsa in file, sulla congiunzione della volta con le pareti laterali.

Queste tecniche migliorerebbero anche i tempi di riverbero per l'evento musicale.

² "Behaviour of lateral energy in small concert halls", Henrik Möller and Jerald Hyde.

Bonifica del pavimento

É buona norma intervenire sul pavimento di cemento, che introduce riflessioni indesiderate. Si consiglia di inserire moquette nelle corsie.

Le quinte acustiche

Per migliorare la variabilità acustica e i tempi di riverbero, si suggerisce utilizzare delle quinte sceniche appositamente progettate. Si suggeriscono quinte di sezione triangolare che su una faccia abbiano caratteristiche fonoassorbenti mentre dall'altra, realizzate per esempio in massello di mogano, sono riflettenti e diffondenti. Tali quinte, alte circa 5 m, possono ruotare e scorrere su binari incassati nella pavimentazione del palcoscenico formando un numero pressochè illimitato di combinazioni con diverse peculiarità acustico-estetiche; in alternativa possono essere impacchettate e riposte senza occupare inutilmente spazio.

Nel caso concerti di musica classica o acustici, si consiglia di aggiungere rivestimenti del retropalco realizzati con massicci pannelli di legno opportunamente orientati verso la platea e lavorati in modo da restituire un campo sonoro diffuso.

Inoltre, alle spalle dei musicisti sulle pedane aperte, sarà opportuno collocare un adeguato materiale diffondente per evitare riflessioni della vicina sorgente.

Cabine regia

A causa dei rumori dovuti agli impianti, si suggerisce di rivestire pavimento e la parte inferiore delle pareti con moquette.

Ulteriori osservazioni

Un ulteriore miglioramento delle caratteristiche della sala potrebbe essere ottenuto modificando il rivestimento delle pareti sopra l'altezza di 4 metri. In particolare, inserendo contropareti fonoassorbenti distanziate dal muro esistente e l'inserimento di pannelli fonoriflettenti inclinati verso il basso. La soluzione alternativa mira a creare una ulteriore scomposizione dei piani di riflessione della sala, ed a rivolgere le prime riflessioni dalle pareti laterali verso il pubblico in sala.

7.3 PROGETTAZIONE DELL'IMPIANTO DI AMPLIFICAZIONE SONORA

L'esigenza di poter utilizzare la stessa sala sia per concerti acustici, sia per conferenze, proiezioni cinematografiche e musica riprodotta si scontra con notevoli difficoltà pratiche. Infatti, se per una sala da concerti è preferibile un certo tempo di riverberazione, pareti o riflettori che consentano di indirizzare il campo sonoro "avvolgendo" lo spettatore, nel caso di utilizzo come sala conferenze o cinema sarebbe auspicabile un tempo di riverbero molto basso e, di conseguenza, pareti assorbenti in modo tale da ottenere la prevalenza dell'onda diretta sul contributo complessivo della risposta all'impulso.

Da queste poche considerazioni, e non sarebbero le uniche, si può evincere come le esigenze siano in contrasto e, apparentemente, per lo meno dal punto di vista geometrico - costruttivo, insolubili.

Per risolvere questo problema è stata creata una sala ad acustica variabile. Ciò è possibile per la realizzazione di pareti composte da più pannelli mobili e girevoli, con una faccia trattata con un materiale fonoassorbente e l'altra con un materiale diffondente. A seconda dell'acustica desiderata, si potranno girare alcuni pannelli da un lato e gli altri dall'altro in proporzione tale da ottenere il tempo di riverbero e le caratteristiche di diffusione e riflessione desiderate. Nel nostro caso questo effetto, pur non esteso in tutta la sala, viene realizzato dalle pareti laterali.

Il secondo approccio nell'adattare la sala alle esigenze di utilizzo, consiste nel dotare la sala di un apparato di amplificazione e riproduzione elettroacustica.

L'intervento proposto si prefigge di ottenere un altissimo grado di fedeltà nella riproduzione del parlato, come della musica o della colonna sonora di un film.

L'impianto proposto, caratterizzato da un'altissima qualità, non è stato pensato per rendere la sala una discoteca, ma piuttosto per fornire prestazioni di qualità e versatilità massime per gli utilizzi per cui la sala è stata progettata. Vi sarà, infatti, la possibilità di registrare, con la qualità di un compact disk, ogni intervento degli oratori, siano essi seduti al tavolo o, tramite radiomicrofono, in piedi vicino al computer collegato ad un videoproiettore.

Si potranno riprodurre sottofondi musicali, l'audio di un qualsiasi canale televisivo (collegandosi al videoproiettore) o registrazioni di altre conferenze.

Nella progettazione di questo impianto erano da tenere presenti due finalità prioritarie: la massima qualità ottenibile relativamente all'uso che se ne sarebbe dovuto fare e il rispetto assoluto dell'estetica della sala. Nella scelta di ognuno dei componenti si è sempre tenuto conto di questi due fattori. In particolare per quanto riguarda le casse acustiche la scelta è caduta su modelli dalle caratteristiche tecniche di particolare pregio, nonostante le dimensioni relativamente contenute.

La caratteristica di queste casse, oltre l'estesa risposta in frequenza ed il livello di pressione sonora indistorto che permettono di ottenere, sta nella loro direttività. Avendo, infatti, una dispersione particolarmente controllata sia sul piano orizzontale sia su quello verticale puntandole opportunamente, si riesce a fare in modo che in ogni punto della platea arrivi l'onda diretta, minimizzando, nello stesso tempo, i contributi dovuti ad eventuali riflessioni dannose.

Questo risultato è importantissimo ai fini dell'intelligibilità del parlato e permette di evitare fastidiosi rimbombi od echi.

L'impianto è composto da :

	Modello	Marca
	Auditorium Audio	
1	Mixer Digitale DiGiCo SD8 completo di:	Digico SD8
	DiGiRack 48 IN / 8 OUT	
	Flyght Case	
	100 m cavo MADI	
2	QUESTED S8R	Quested
12	KW 122 (12", 2 Way powered speaker)	QSC
4	KW 181 (18" BandReflex powered Subwoofer)	QSC
1	ULXP4 Wireless Mic receiver Shure	Shure
8	ULX1 body pack + WL51 Lavalier mic Shure	Shure
2	ULX2-SM58, Handheld wireless microphone Shure	Shure
	Auditorium Struttire	
8	Thomas B3940,Squarelite Truss 30X30 L:4m	
1	Motori LTM (400V,50Hz,250Kg,4m/min)	C.O.W Lifting Technology GmbH
1	Controller	C.O.W Lifting Technology GmbH
1	Accessori - Catene (11m), cavi, staffe, raccoglitori	

Tab.7.6. – Composizione dell'impianto di amplificazione sonora.

Il mixer sarà posizionato in regia con i due diffusori Quested S8R.

Le altre casse permettono di organizzare in maniera ottimale i vari scenari compresi tra le possibili destinazioni d'uso della sala. Alcune verranno posizionate a terra, altre in altezza.

Saranno presenti 4 americane motorizzate fisse nella sala. Saranno predisposte delle prese in quota sulle americane per permettere il cablaggio audio a 220 V per l'audio bilanciato. In figura il dettaglio schematico per le predisposizioni adottate. Nella figura 7.15 della pagina seguente, sono visibili le 4 americane in quota con linea spessa di colore nero.

Le casse utilizzate per i canali frontali, nel caso di un'eventuale palco a fondo sala, sono di qualità indiscutibile e sopportano altissime potenze senza distorsioni alcune. La loro peculiarità consiste in un'accentuata direttività che permette, tramite un preciso orientamento, di indirizzare le onde sonore esclusivamente sugli ascoltatori.

I sub woofer sono di potenza adeguata e permettono l'emissione del segnale sonoro anche nella parte bassissima dello spettro. La loro sistemazione non è critica in quanto le basse frequenze tendono a divenire omnidirezionali.

Le casse di surround sono di ottima qualità, perfino esuberante rispetto alla tipologia di segnali che saranno preposti a riprodurre.

Ci saranno 12 diffusori in dotazione con caratteristiche tali da poter essere utilizzati indifferentemente come canali frontali, canali surround o monitor da palco.

L'impianto verrà comunque diversamente sfruttato in base alle varie destinazioni d'uso come suggerito nella tabella seguente che prende in considerazione alcune tipiche configurazioni.

Naturalmente per il caso del concerto amplificato la modalità di utilizzo dell'impianto dipende dal tipo di evento, dai musicisti e dall'affollamento. Il riferimento al numero delle casse considerate quindi è solo indicativo rispetto alla situazione peggiore, ossia elevato numero di musicisti, massimo affollamento e diversificazione del genere musicale proposto.

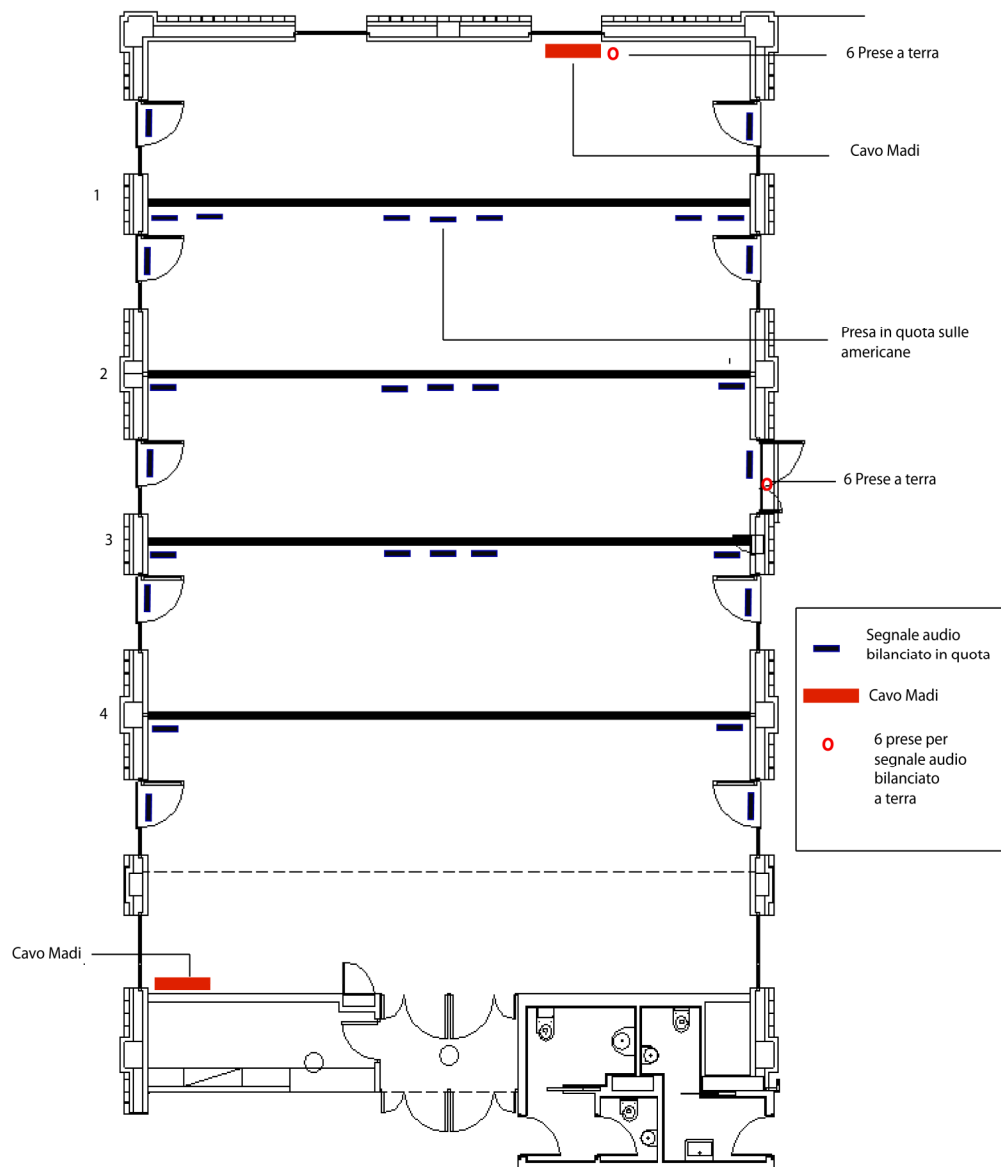


Fig. 7.15 – Pianta del cablaggio dell'impianto.

Sistema di amplificazione						
Destinazioni d'uso (evento amplificato)	Palco	Americane (minimo)	Prese a terra	Prese in quota (minimo)	Subwoofer KW 181 (indicativo)	KW 122 (indicativo)
A. Concerto	centrale	2-3	centrali per monitor	prevalentemente centrali	4	8 + 4 (spie)
	fondo sala	1	fondo sala per monitor	una centrale e due laterali	2	8 + 4 (spie)
B. Cinema	assente	tutte	no	prevalentemente laterali prese frontali (centrali nell' americana 1)	2 o 4 fondo sala	8
C. Conferenza	fondo sala	1	A fondo sala per casce a terra	Centrali e laterali	2 fondo sala	8

Tab.7.7. – Sistema di amplificazione nelle diverse configurazioni.

Nel caso A con palco centrale, se il pubblico circonda completamente il palco, ognuna delle americane centrali può utilizzare due prese centrali per collegare le casce e direzionare il suono verso il pubblico a fondo sala e verso l' ingresso, mentre la terza presa disponibile in ogni americana può orientare la diffusione verso le pareti laterali.

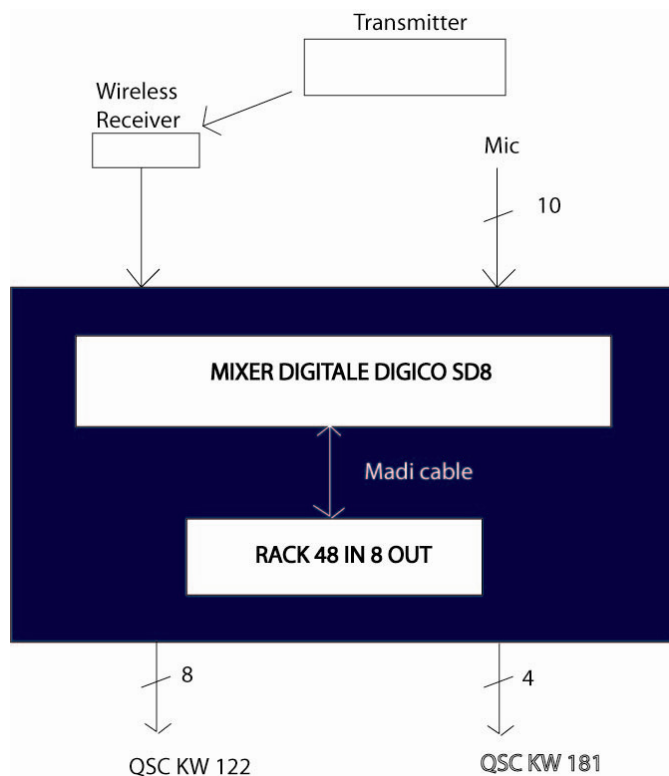


Fig.7.16 - Schema di collegamento del mixer in sala regia.

Differente invece sarà il caso della diffusione sonora nel caso di messaggistica di emergenza e musica di sottofondo riguardante tutto il comparto denominato Casa della Cultura. Si rimanda al capitolo relativo.

Sarà presente anche un videoproiettore a livello delle catene sulla prima americana a fondo sala per la proiezione su uno schermo di minimo 6 metri.

PROGETTAZIONE ACUSTICA DEL TEATRO LENZ

8

8.1 IL TEATRO LENZ

Il Lenz è un teatro d'avanguardia, un luogo di produzione culturale, di sperimentazione e formazione teatrale, oltre che di ricerca musicale.

Il progetto di riqualificazione dell'area compresa nel progetto STU Pasubio, prevede lo spostamento dell'attuale teatro, che svolge la propria attività in un edificio industriale della periferia storica di Parma.

La sua forma e struttura richiamano le dimensioni e le scelte costruttive dell'auditorium. Si rimanda la lettura a molte delle considerazioni fatte riguardo la sua progettazione acustica nel capitolo precedente.

Il Lenz permetterà una capienza superiore ai 100 posti a sedere, è previsto un eventuale palco a fondo scena, e 10 pannelli a scorrimento verticale di materiale fonoassorbente a copertura delle finestre delle pareti laterali.

Le misure approssimative comprendono un volume di all'incirca 1250 metri cubi, con circa 4.4 metri di altezza minima. La regia è progettata a balcone nella parete a fondo sala, estesa in larghezza e sopraelevata di circa 3.6 metri.

Di seguito parte della pianta con il dettaglio dei pannelli.

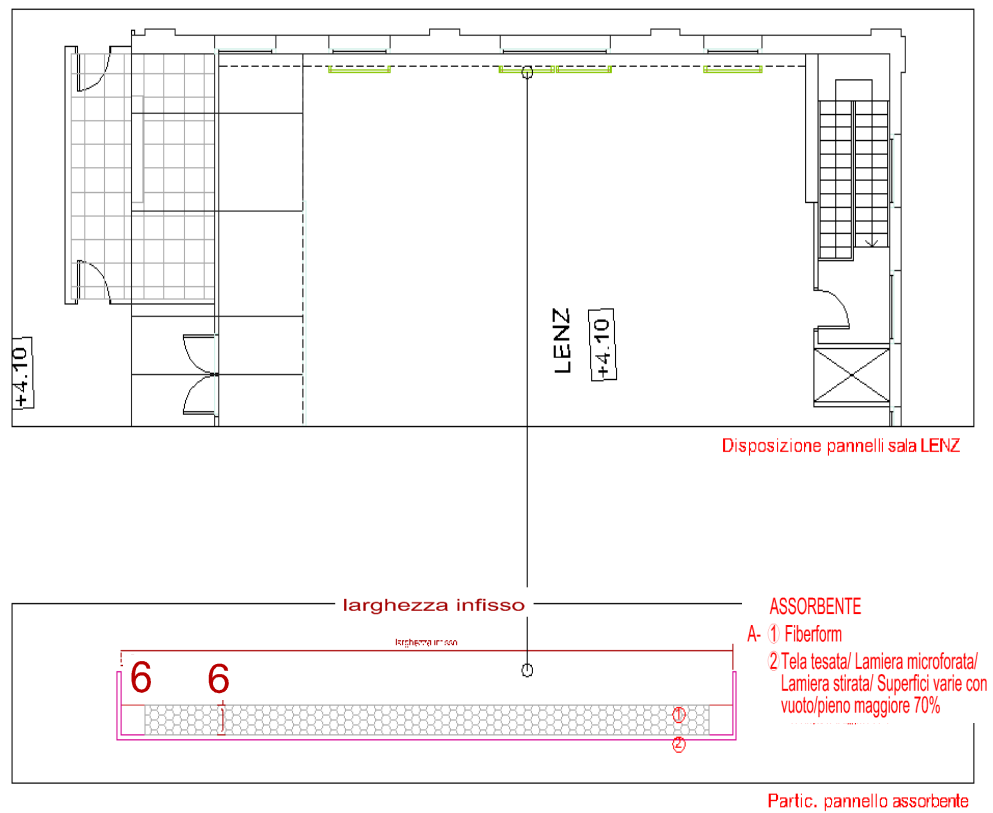
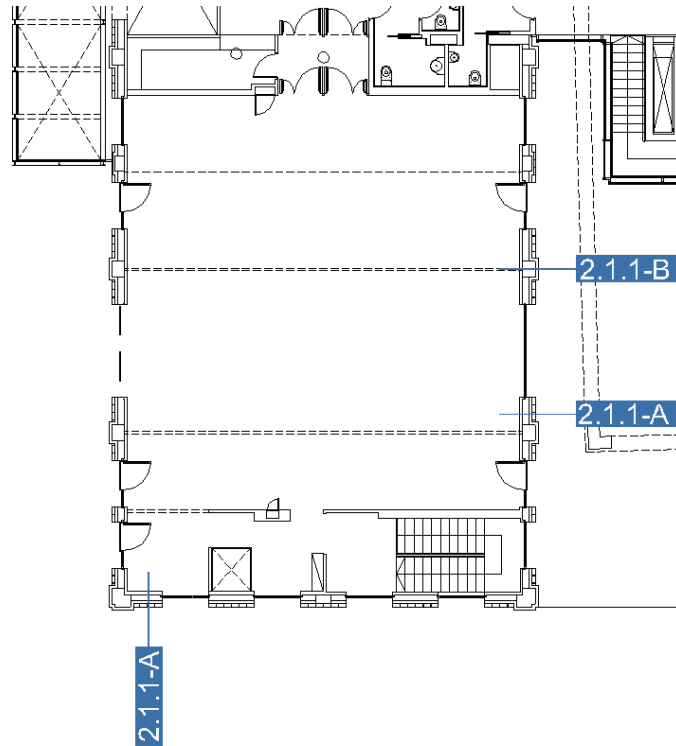


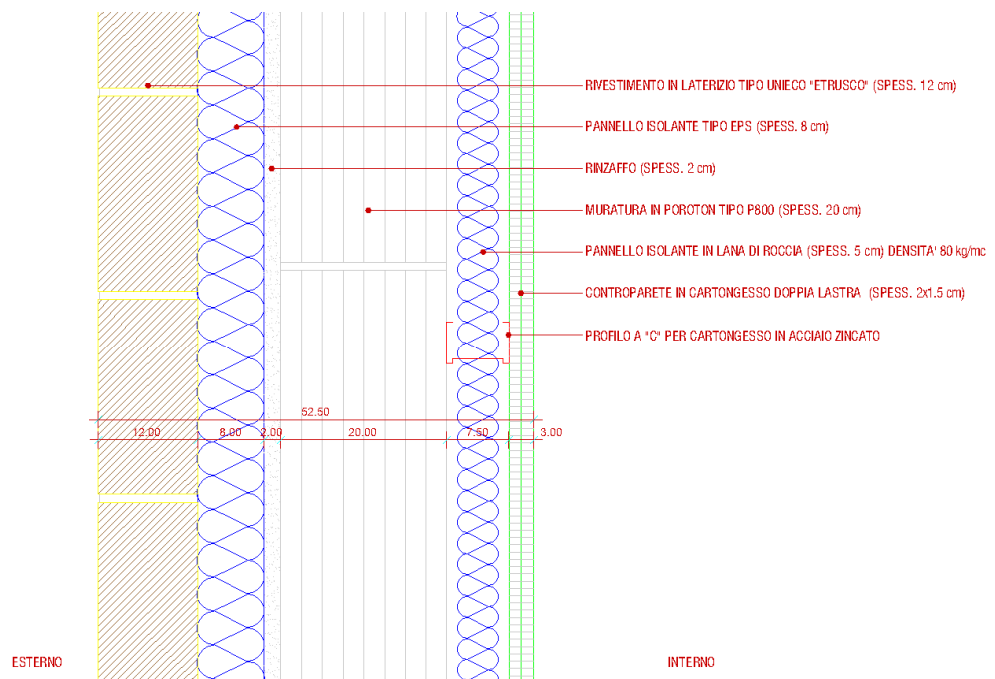
Fig.8.1 – Dettaglio della pianta del teatro Lenz con un'immagine dei pannelli a scorrimento.

8.2 LA CONFORMAZIONE DELLE PARETI

Le pareti esterne in progetto per il Lenz hanno la stessa conformazione considerata per l'Auditorium e sono raffigurate di seguito. Anche per le pareti interne sono riportati gli schemi di struttura.

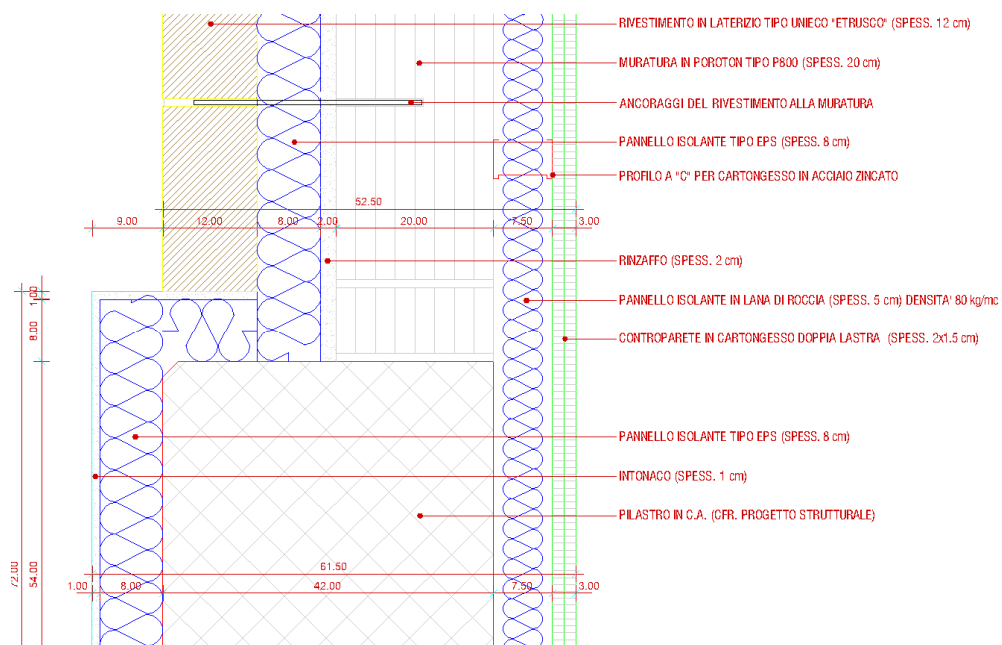


(a)



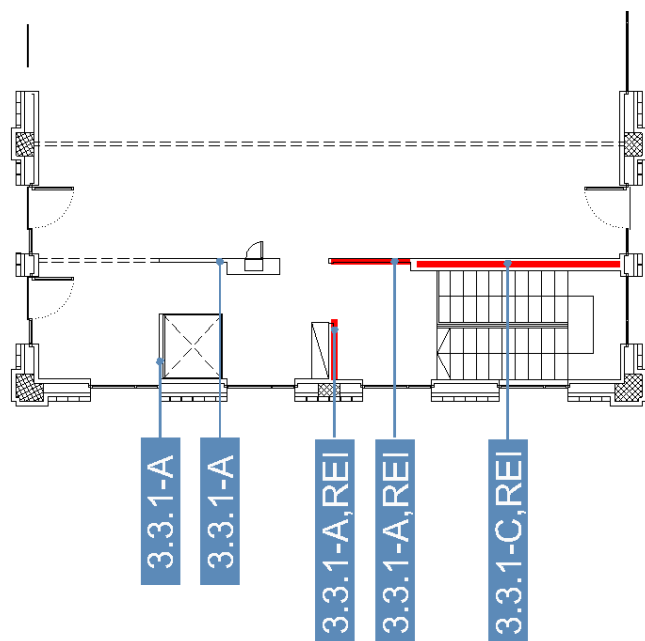
Sezione orizzontale 2.1.1- A

(b)

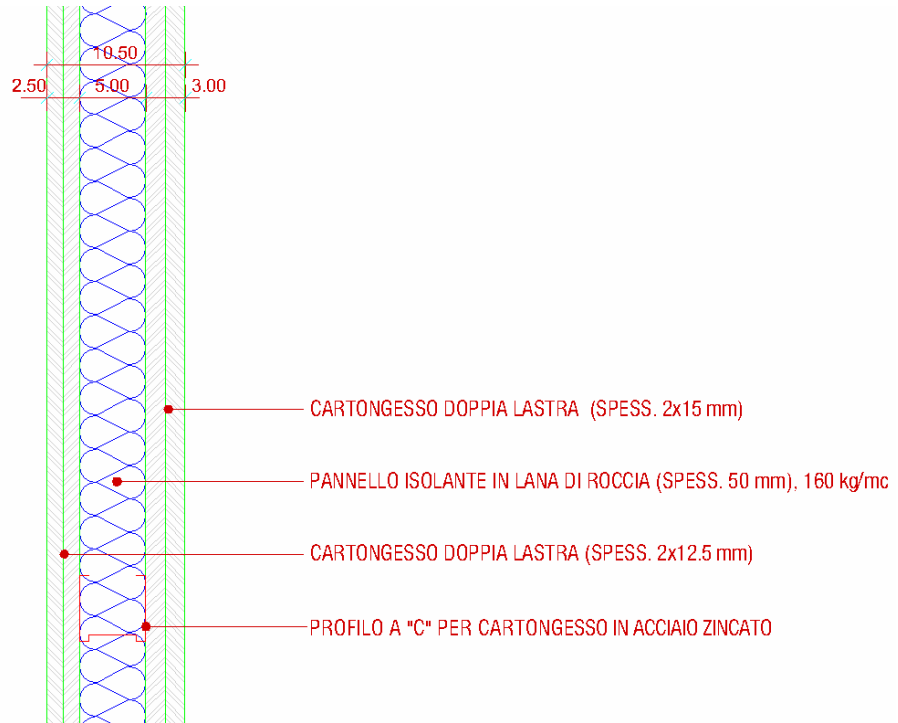


Sezione orizzontale 2.1.1- B

(c)

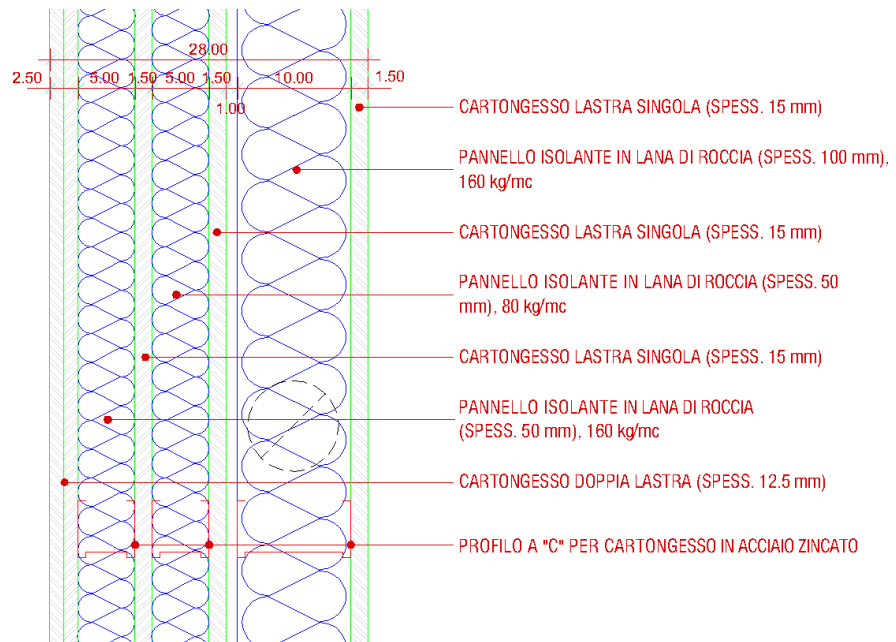


(d)



Sezione orizzontale 3.3.1- A

(e)



Sezione orizzontale 3.3.1- C

(f)

Fig.8.2. – Piante e schemi strutturali delle pareti esterne (b,c) ed interne (e,f) del Lenz.

8.2.1 LA SCELTA DEI MATERIALI

Per la scelta dei materiali valgono le stesse considerazioni fatte in precedenza per l'Auditorium, in particolare per il controsoffitto, pavimento e le pareti laterali.

Sono inoltre state eseguite simulazioni con modello di calcolo in varie configurazioni di progetto, fino a definire la soluzione che rappresenta il miglior equilibrio tra esigenze funzionali e caratteristiche acustiche.

Le caratteristiche e i materiali prescelti sono stati i seguenti:

- *porte*: vetro. Quelle interne sono di lamiera metallica.
- *finestre*: vetro coperte da pannelli fonoassorbenti.
- *regia*: sviluppata in lunghezza sul lato d'ingresso, sarà costituita dal parapetto e pavimento in cemento, con parete in cartongesso.

8.3 STUDIO PREVISIONALE DEL CAMPO ACUSTICO ALL'INTERNO DELLA SALA.

Il teatro, come l'auditorium, é rettangolare in pianta e sezione con un volume di circa 1250 metri cubi. Per la forma dell'edificio per esso valgono le considerazioni precedenti per quanto riguarda le difficoltà incontrate nell'affrontare la bonifica acustica.

Nelle pareti laterali pannelli scorrevoli di materiale fonoassorbente, nello specifico fiberform, coprono le finestre.

L'elaborazione grafica che segue offre una vista interna concettuale del progetto esecutivo realizzato.

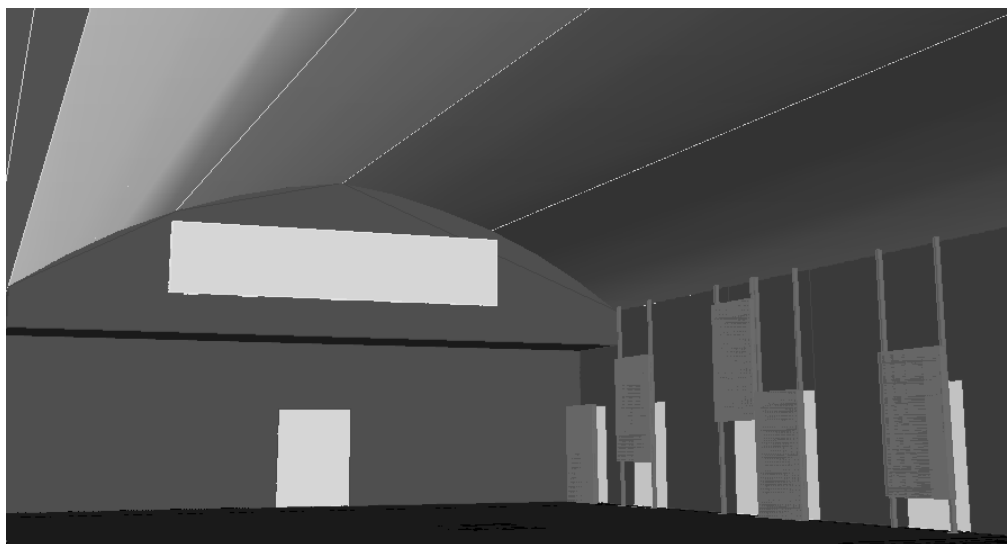


Fig.8.3. – Immagine descrittiva dell'iterno del modello utilizzato.

8.3.1 TEMPO DI RIVERBERO OTTIMO

La sala in analisi è sede di eventi di diversa realizzazione. È una sala polivalente che ospita il teatro d'avanguardia.

Le destinazioni d'uso dell'edificio in esame possono essere : cinema, teatro di posa, auditorium, sala conferenze, sala concerto se amplificato, sala di regia.

Per ognuno di questi eventi si studierà la corrispondente soluzione ottima per la configurazione dei pannelli scorrevoli. Nella seguente tabella riportiamo i massimi superiori e inferiori per i tempi di riverbero ottimali a 500 Hz suggeriti per via empirica per un teatro di circa 1250 metri cubi destinato agli alcuni degli utilizzi sopra elencati e le configurazioni più estreme.

Tempi di riverbero							
Hz	125	250	500	1 k	2 k	4 k	8 k
Tr ottimo superiore Auditorium per parlato (tr ott=0,82)	1.23	0.98	0.82	0.71	0.67	0.68	0.73
Tr ottimo inferiore Auditorium per parlato (tr ott= 0,82)	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.66	0.62
Tr ottimo superiore Cinema, Teatri di Posa (tr ott=0,75)	1.13	0.90	0.75	0.65	0.62	0.62	0.67
Tr ottimo inferiore Cinema, Teatri di Posa (tr ott=0,75)	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.60	0.56
Tr ottimo superiore Sale da concerto (tr ott=1,25)	1.88	1.50	1.25	1.09	1.03	1.04	1.11
Tr ottimo inferiore Sale da concerto (tr ott=1,25)	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.00	0.94
Tr ottimo superiore Teatro (musica opera) (tr ott=1,00)	1.50	1.20	1.00	0.87	0.82	0.83	0.89
Tr ottimo inferiore Teatro (musica opera) (tr ott=1,00)	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.80	0.75

Tab 8.1 - Variazione del tempo di riverbero ottimale con la frequenza, estremi superiori e inferiori.

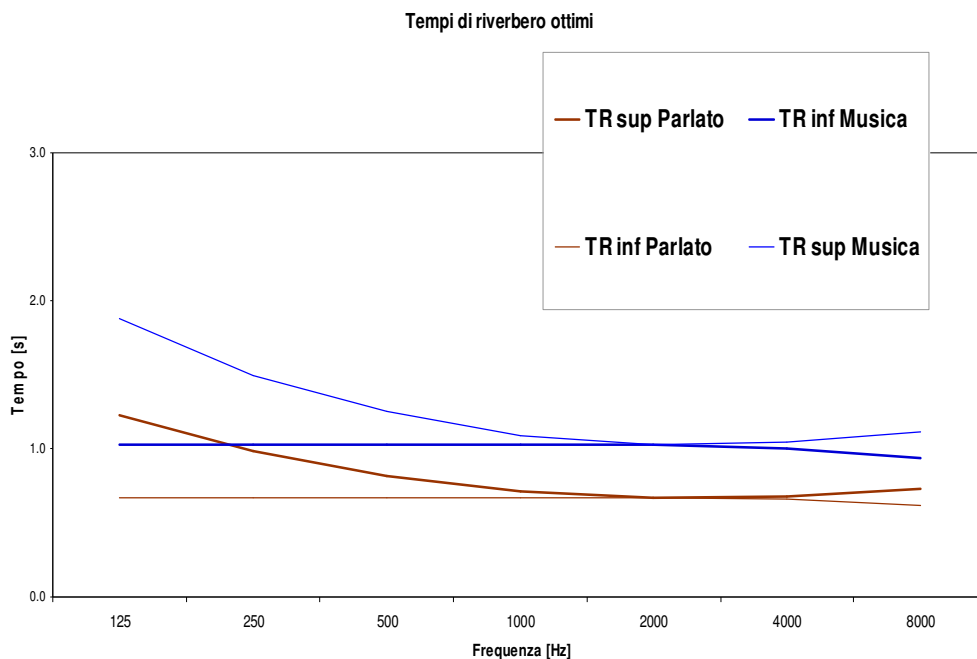


Fig.8.4. – Tempi di riverbero ottimi per parlato e musica, per una sala di circa 1250 metri cubi

Il nostro obiettivo sarà quello di realizzare una sala polifunzionale, che prevede un assetto ottimo nella configurazione proposta concordando esigenze progettuali ed estetiche, rispettando i limiti empirici di progetto qui esposti.

8.3.2 MODELLO DI CALCOLO

Nell'immagine seguente riportiamo una vista 3D del modello geometrico, in cui è visibile l'interno dell'Auditorium, provvisto di finestre e pannelli mobili capaci di scorrere verticalmente.

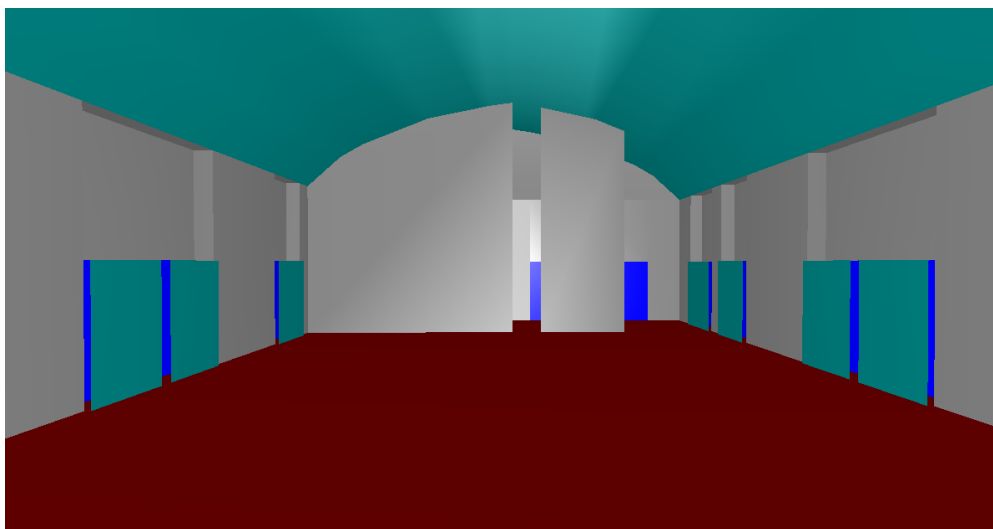


Fig.8.5. – Modello dello stato in progetto: vista 3D dall'ingresso.

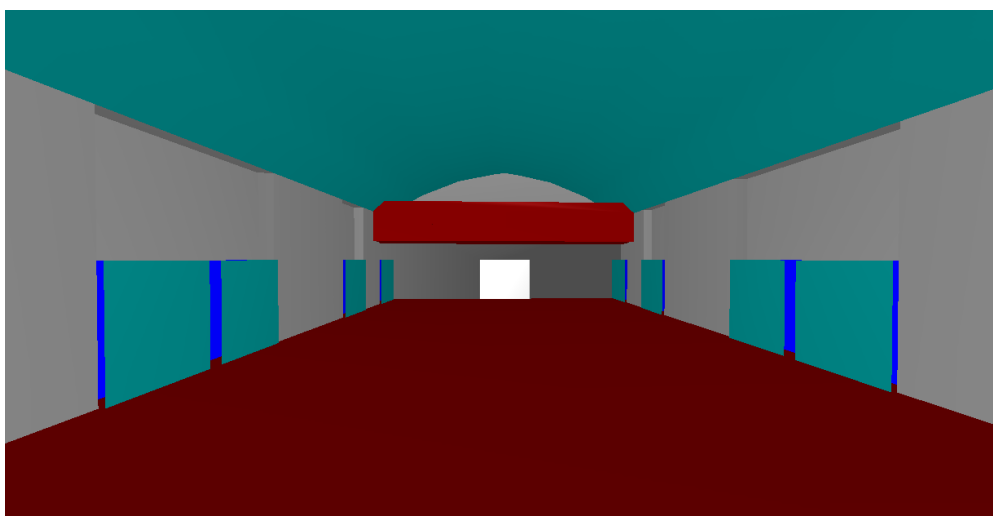


Fig.8.6. – Modello dello stato in progetto: vista 3D dalla regia.

Di seguito vengono riportate le caratteristiche acustiche dei vari materiali prescelti, così come sono

state fornite dalle ditte ed inserite nel modello numerico:

coefficienti di fonoassorbimento										
Hz	31.5	63	125	250	500	1 k	2 k	4 k	8 k	16 k
Fiberform 62T-100mm ,30 Kg/mc	0.265	0.304	0.395	0.648	0.747	0.698	0.685	0.728	0.716	0.716
Cartongesso	0.182	0.182	0.139	0.085	0.048	0.029	0.048	0.067	0.085	0.085
Cemento	0.010	0.010	0.010	0.030	0.050	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
Porta in ferro	0.010	0.010	0.010	0.010	0.020	0.020	0.030	0.030	0.030	0.040
Lastra di vetro	0.140	0.270	0.180	0.060	0.040	0.030	0.020	0.020	0.020	0.020

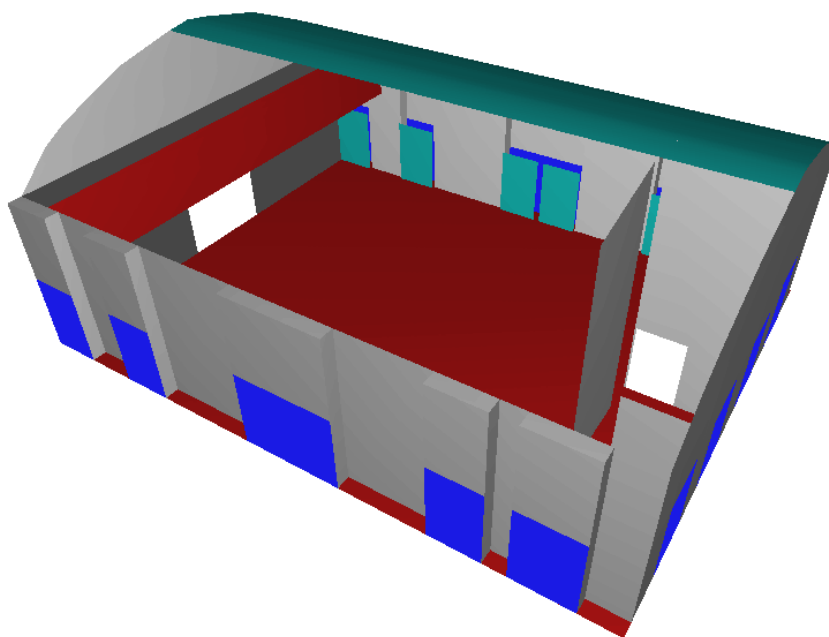
Tab.8.2. – Coefficienti di fonoassorbimento per i materiali utilizzati nella simulazione.

La seguente vista prospettica della sala arredata indica l'esatta posizione di tutti i materiali, così come sono stati progettati ed inseriti nel modello previsionale.

Ad ogni superficie sono state assegnate le caratteristiche di fonoassorbimento tipiche dei materiali di cui sono composte.

La bonifica acustica interverrà quindi necessariamente sul soffitto e sulle pareti laterali.

Anche in questo caso gli allestimenti prevedono un palco mobile (centrale o a fondo scena) e a scomparsa, secondo l'uso. In particolare, il palco centrale è ideato per coinvolgere maggiormente il pubblico durante le scene durante una rappresentazione teatrale.



(a)

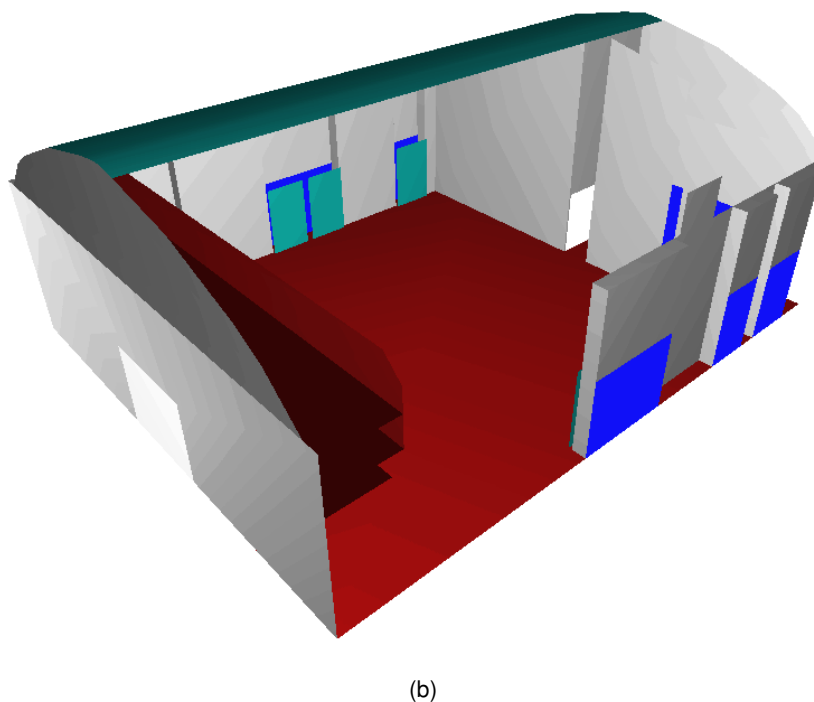


Fig 8.7. – Viste descrittive dell'interno del modello utilizzato per il teatro Lenz.

8.4 CASI DI STUDIO

Sulla base delle considerazioni fatte, sono state eseguite simulazioni con modello di calcolo nella configurazione di progetto, a sala vuota e con i pannelli coprenti le finestre.

Configurazione	Soffitto	Pareti di fondo	Pavimento	Pereti laterali	Palco
1	Fiberform	Cartongesso	Cemento	Cartongesso	Non presente

Tab.8.3 – Materiali utilizzati per il teatro Lenz .

8.4.1 PARAMETRI DI CONFIGURAZIONE

Come nel caso dell'Auditorium, anche per il Lenz è stato utilizzato un livello di precisione di calcolo abbastanza elevato, dal momento che, da ogni sorgente puntiforme, vengono sparati 2048 fasci piramidali, ($\text{level}=8$, $8 \cdot 2^8=2048$). Il tempo di corsa dei raggi è stato esteso fino a 5 secondi ($\text{time}=5$ s), e quindi oltre il tempo di riverbero dell'ambiente. Per quanto riguarda l'utilizzo dei coefficienti di scattering, questa opzione è stata attivata ($\text{Diffusion}=\text{On}$) in modo da tenere conto anche dell'effetto di diffusione.

I parametri di configurazione utilizzati nel modello di calcolo sono riportati nella tabella che segue.

Parametri di calcolo	
Level	8
Time	5 [s]
Precision	0.001 [s]
Humidity	50 %
Temperature	20 C
SoundSpeed	343.294411402225 m/s
Diffusion	On
RandomizeAfter	4

Tab. 8.4. – Parametri di configurazione della simulazione.

Poiché la struttura, forma e materiali del teatro Lenz riprendono molte delle caratteristiche già considerate per l'Auditorium, ci aspettiamo un'analisi per molti aspetti simile. Per questo motivo, e per non riportare informazioni ridondanti, si è preferito collocare la sorgente su un'ipotetico palco a centro scena, leggermente spostato rispetto al centro, per non ripetere l'analisi a fondo scena fatta nel capitolo precedente e per introdurre quindi nuovi spunti di analisi. La sorgente si rivolge a 7 ricettori coprenti l'area della sala.

8.4.2 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

É stato simulato il modello di calcolo con la configurazione dei materiali considerati. Tale assetto simula un' evento a sala spoglia. E' stato calcolato il caso con pannelli abbassati e il caso con le finestre scoperte. L'effetto si nota nel grafico sottostante : i valori si assestano su cinema, auditorium, ossia evento parlato, e teatro d'opera.

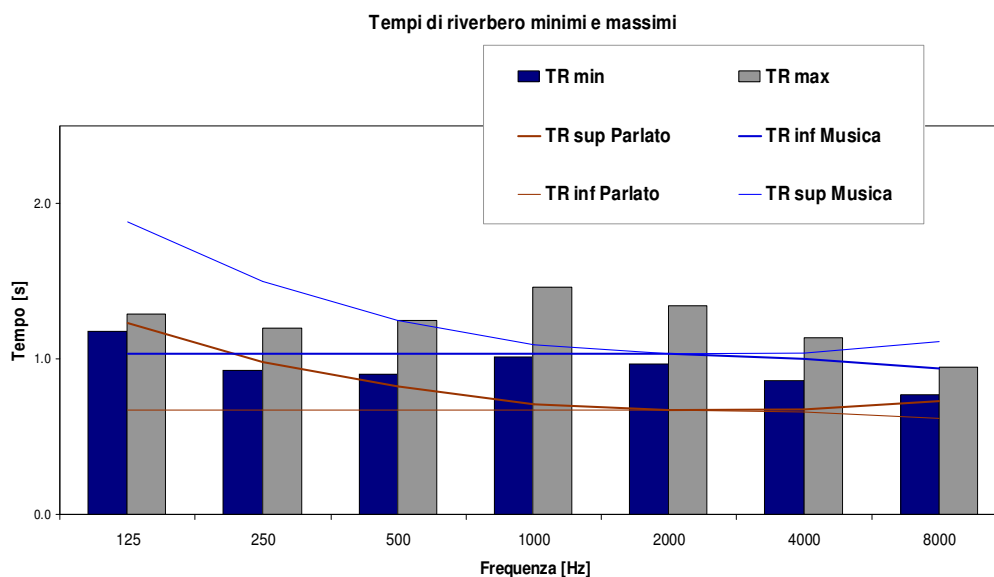
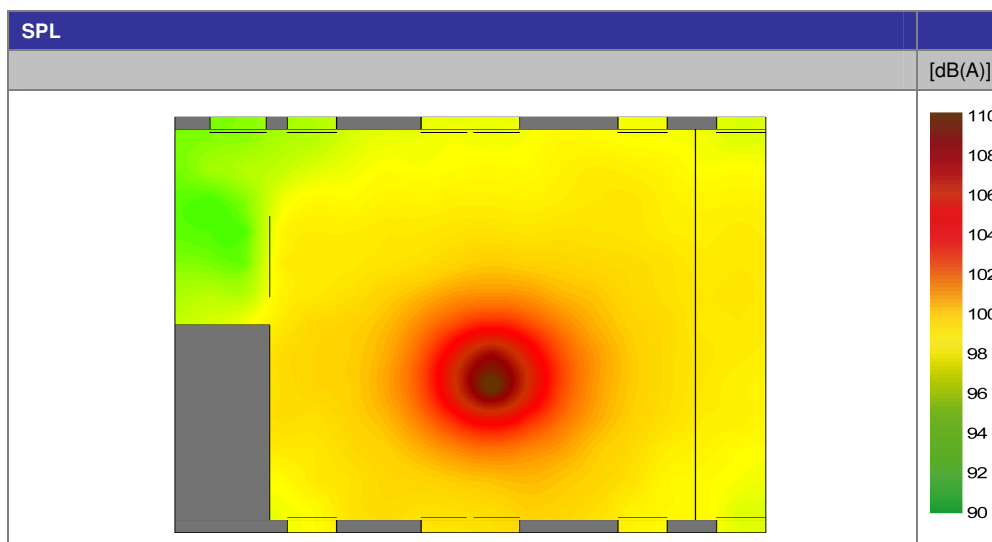


Fig.8.8 – Tempi di riverbero massimi e minimi calcolati nella sala confrontati con quelli ottimi.

E' evidente dal grafico che l'andamento non lineare delle curve, e l'accentuazione delle medie ed alte frequenze, evidenzia l'assetto spoglio della sala vuota, senza palco né persone, ma altresì la necessità di una bonifica acustica della volta e delle pareti. Valgono per il Lenz le considerazioni fatte per l'Auditorium.

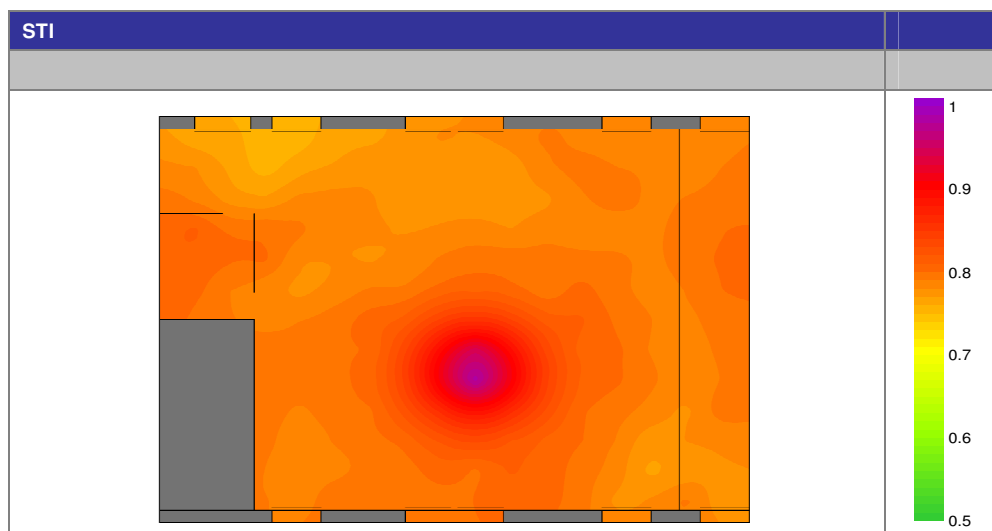
Livello di pressione sonora

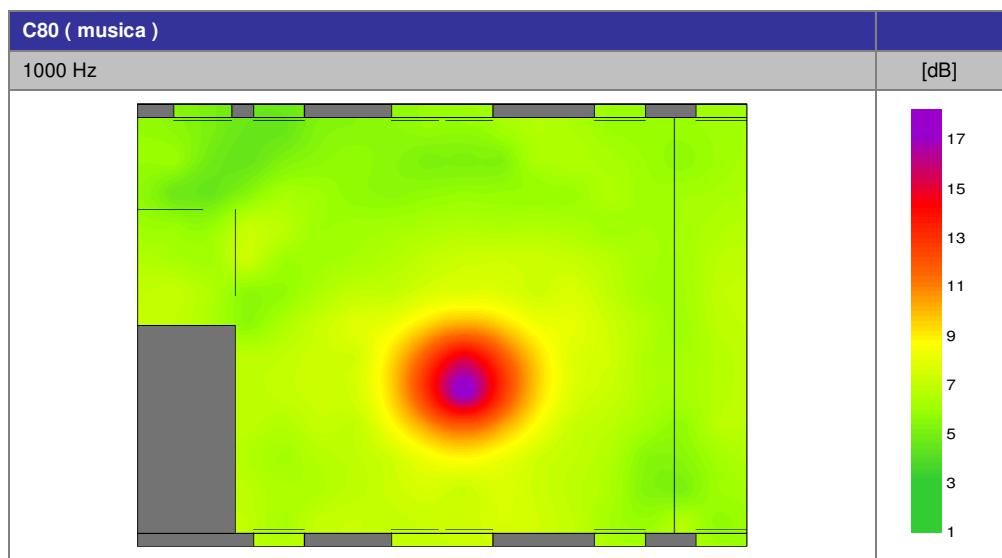
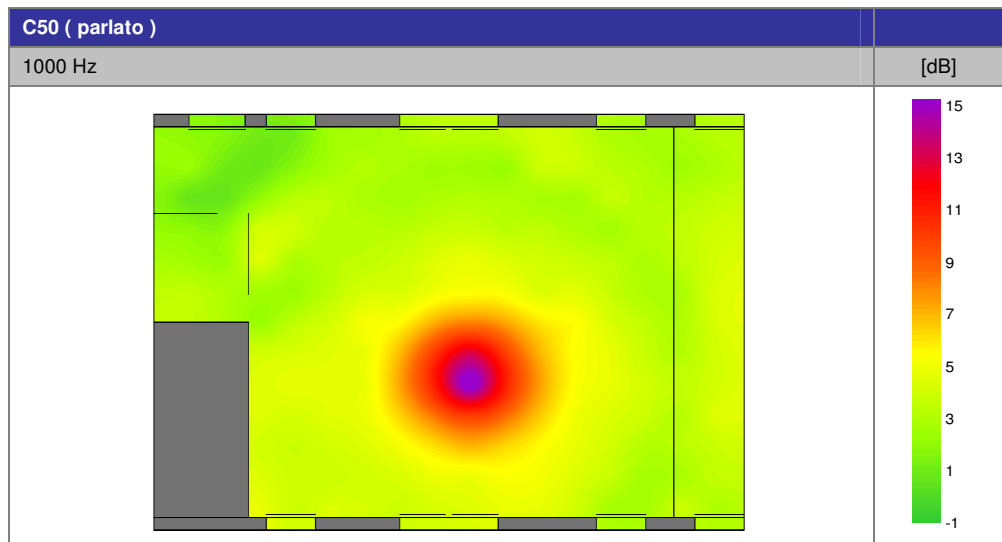
La distribuzione del livello di pressione sonora *SPL* pesato A risulta uniforme se si esclude le prossimità alla sorgente.



Indice di intelligibilità del parlato STI e indici di chiarezza C50 e C80 a 1000 Hz.

Lo STI è superiore a 0.8 in tutta la sala.





CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

9

Il nuovo complesso denominato STU Pasubio, realizzato su progetto del celebre architetto catalano Oriol Capdevila rappresenta uno dei più importanti eventi urbanistici, culturali e sociali realizzati a Parma negli ultimi anni. E' un complesso multifunzionale in parte dedicato alla musica e ad eventi di spettacolo, di particolare interesse di questa analisi.

La competenza progettuale richiesta è stata tanto architettonica quanto acustica : non è un'opera solo tecnologica, poiché centro di studi, laboratori, di sperimentazioni tecniche con mezzi di variabilità acustiche; bensì un manufatto architettonico che tenta di essere anche ben suonante. Come presentato in questo studio questo connubio può favorire una parte piuttosto che l'altra e quasi sempre la disponibilità di mezzi e strutture le limita entrambe. Con questi vincoli sono stati progettati i mezzi e i materiali che potessero incidere positivamente nelle caratteristiche acustiche dei vari comparti, è chiaro quindi che gli obiettivi di disegno acustico sono ottenuti dentro i margini permessi.

Lo studio Genesis di Paolo Galaverna ha curato analogicamente tutta la caratterizzazione acustica del complesso, in particolare dell'Auditorium e del teatro Lenz, definendo le connotazioni formali e materiali interne alle due sale, nel pieno rispetto dell'input architettonico proposto.

La progettazione si è fondata sul confluire di esperienze, idee, simulazioni al computer con quantificazione delle caratteristiche acustiche in termini di parametri numerici. In più sono stati proposti e in parte realizzati assetti variabili per l'ottimizzazione dell'acustica in relazione all'impiego della sala.

I parametri descritti in fase di progettazione sono un'utile guida per evitare errori ed effetti indesiderati, difficili da correggere post operam, infatti, il principale strumento che tali parametri ci forniscono è sicuramente l'esplicitazione dei rapporti che sussistono fra le diverse descrizioni oggettive: questi parametri sono in relazione fra loro e averne consapevolezza significa poter intervenire per correggere un difetto senza incorrere nel rischio di crearne o accentuarne un altro.

Dalla lettura dei descrittori acustici è stato condotto lo studio previsionale delle sale in questione, da cui emergono punti a favore ma anche diverse problematiche, che suggeriscono qualche aggiustamento. Nonostante allo stato dell'arte non sono ancora in progetto elementi aggiuntivi per il risanamento acustico, in questa trattazione sono state proposte tecniche e migliorie per raggiungere i livelli desiderati nell'ottica di ottimizzare l'acustica delle strutture adibite a spettacolo.

In particolare nel caso dell'Auditorium, nella configurazione di progetto attuale, un problema incontrato è rappresentato dalla difficoltà di ampliare la sua destinazione d'uso al genere musicale - concertistico, a causa delle brevi escursioni del livello di riverbero dalla configurazione parlata, per la quale i descrittori acustici si assestano sui valori desiderati. Ciò è da inficiare alla necessità di migliorare l'assetto scenico, trattando acusticamente le pareti interessate perché migliorino le proprietà riflettenti, oppure aggiungendo delle quinte acustiche, ma soprattutto è da attribuire alla forma della volta, per la quale si propongono movimentazione a soffitto addizionali con pannelli a discesa atti a diffondere uniformemente il suono in platea, contrastando la focalizzazione della volta. Un consiglio che vorrei avanzare è quello di non rimanere fermi su un'idea progettuale, che sia il disegno delle pareti o quello del soffitto: provando a cambiare, applicando la fantasia e la tecnica al problema, in opzione alla testardaggine, la soluzione ottenuta sarà sicuramente originale e più adatta.

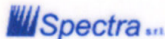
Il trattamento acustico della sala non è di per sé sufficiente ad assicurare una buona riuscita dell'assetto considerato, vi sono ulteriori accorgimenti necessari a una buona realizzazione del progetto. Occorre infatti tenere presenti numerosi aspetti collaterali che possono influire significativamente sulla fruizione dell'evento, sia esso parlato o musicale, attinenti ad esempio ai requisiti acustici passivi. Pur non esistendo una norma che indichi i requisiti d'isolamento minimi per una struttura di pubblico spettacolo ed espositiva è opportuno individuare potenziali criticità che dovrebbero essere affrontate, questo vuole essere un input per lo sviluppo di un'analisi più approfondita.

La progettazione degli impianti dovrà tenere conto di vari aspetti per consentire un corretto funzionamento delle apparecchiature durante le rappresentazioni. Il rumore generato dagli impianti sanitari, di riscaldamento e di ventilazione, si propaga all'interno degli edifici sia per via aerea sia per via strutturale (a seguito di moti vibratorii trasmessi alla struttura dell'edificio) e risulta maggiormente fastidioso quanto più basso è il rumore di fondo all'interno dei locali in esame.

E' evidente infine che il progetto presentato apre le porte a molteplici studi successivi, dalle tecniche d'ascolto soggettive che coinvolgono persone "educate" a tale esercizio, all'analisi mirata per il miglioramento continuo delle tecniche e dei materiali a disposizione, oltre alla considerazione delle tecniche di auralizzazione soprattutto in vista di studiare l'effetto delle sorgenti sonore che si propagano dalle innovative pedane a scomparsa dalle pareti dell' Auditorium.

Nonostante i continui tentativi di conoscere le forme, le caratteristiche e il comportamento del suono in una sala, è un arduo compito descrivere una percezione soggettiva con parametri oggettivi, perché si rischia di "appiattire" la sonorità di un ambiente ad uno standard medio, che magari non presenta difetti, ma probabilmente non ne esalta i pregi. E' chiaro quindi come questo lavoro rappresenti solo l'input iniziale per tanti e diversi studi e migliorie.

ALLEGATO A – CERTIFICATI DI TARATURA

SIT	SERVIZIO DI TARATURA IN ITALIA <i>Italian Calibration Service</i>		
CENTRO DI TARATURA 163 <i>Calibration Centre</i>			
	Spectra Srl Laboratorio Certificazioni Via Belvedere, 42 Arcore (MI) - Italia	Tel.: 039 613321 Fax: 039 6133235 spectra@spectra.it www.spectra.it	
ESTRATTO DEL CERTIFICATO DI TARATURA N. 3799 <i>Extract of Calibration Certificate No. 3799</i>			
Data di Emissione <i>Date of Issue</i>		2008/09/30	
Destinatario <i>Addressee</i>		GENESIS Acoustic Workshop Srl di Galaverna Paolo via Benedetta 83 Parma	
Condizioni ambientali durante la misura <i>Environmental parameters during measurements</i>			
Pressione		993,0 hPa	
Temperatura		23,4 °C	
Umidità Relativa		42,6 %	
Strumenti sottoposti a verifica <i>Instrumentation under test</i>			
Strumento	Costruttore	Modello	N°Serie/Matricola
Fonometro	LARSON DAVIS	L&D 824 SLM	0510
Microfono	LARSON DAVIS	L&D 2541	7415
Preamplificatore Mic		L&D PRM902	0916
Il Responsabile del Centro <i>Head of the Centre</i>			
Caglio Emilio 			

ALLEGATO B – SCHEDE DI MISURA



UBICAZIONE PUNTO		COORDINATE UTM			
Via Palermo - Parma		x: 0605314	y: 4962668	± 5	[m]

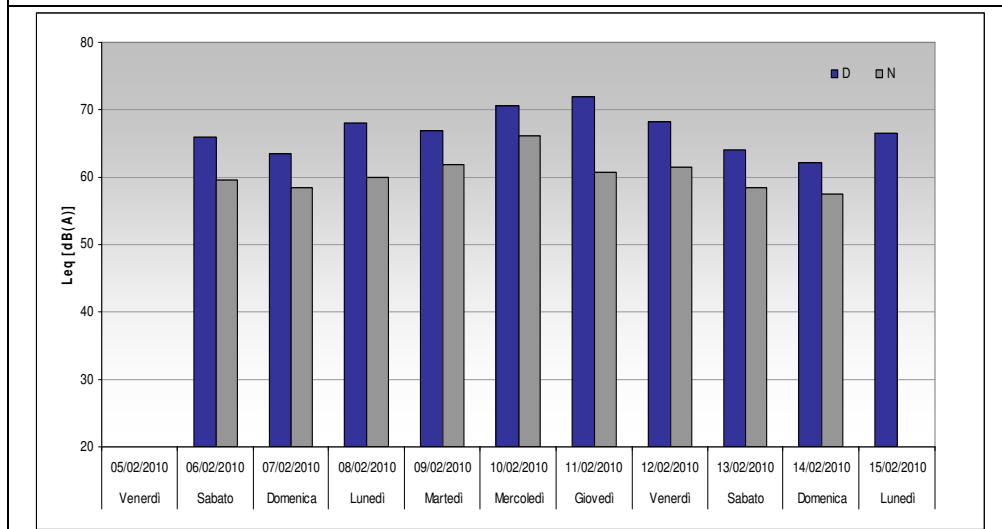
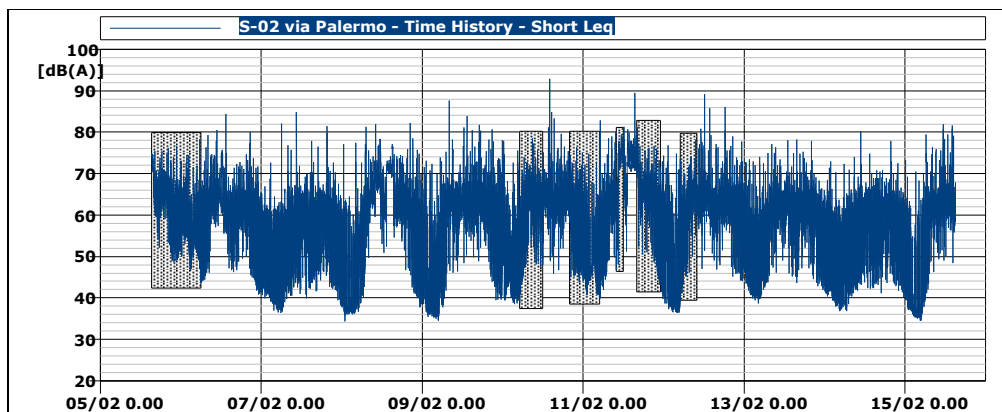
FONOMETRO		CALIBRATORE	
Larson Davis 824 S.N. A0510		Larson Davis CAL200 S.N. 0471	

MICROFONO		
Altezza da terra	5.0	[m]
Distanza bordo strada - ferrovia	2.0 – 15.0	[m]
Distanza da superficie riflettente	3.0	[m]

TIPOLOGIA DELLA SORGENTE DI RUMORE					
☒ strada	☒ ferrovia	☐ fissa prod.	☐ fissa comm.	☐ fissa ricreativa	☐ altro:
Denominazione: via Palermo – linea ferroviaria					

LIMITI DI ZONIZZAZIONE ACUSTICA		
L _{eq} D	65.0	[dB(A)]
L _{eq} N	55.0	[dB(A)]

		L _{eq} [dB(A)]	
Giorno		D	N
1	Venerdì	X	x
2	Sabato	66.0	59.7
3	Domenica	63.4	58.4
4	Lunedì	68.0	60.0
5	Martedì	66.9	62.0°
6	Mercoledì	70.5°	66.1°
7	Giovedì	72.0°	60.8°
8	Venerdì	68.2°	61.6
9	Sabato	64.1	58.5
10	Domenica	62.1	57.5
11	Lunedì	66.6*	-
Media settimanale		67.8	60.9



NOTE
- x mascheratura completa del periodo causa pioggia ° mascheratura parziale del periodo causa pioggia * periodo incompleto - non disponibile

Tecnico competente in acustica	Firma
Andrea Rosati	<i>Andrea Rosati</i>

ALLEGATO C – RAMSETE

METODOLOGIA PROGETTUALE ED UTILIZZO DEL SOFTWARE

Per lo studio del progetto acustico delle due sale si è fatto largo uso del software Ramsete, ormai ben conosciuto fra i professionisti del settore.

Il pacchetto Ramsete è nato specificatamente per fornire un valido supporto al consulente acustico che intenda utilizzare per i suoi progetti un approccio moderno ed efficiente ed è formato da 5 programmi principali: Ramsete CAD, Material Manager, Source Manager, Ramsete Trace, Ramsete View.

Ramsete CAD è un vero e proprio CAD per la creazione di geometrie tridimensionali che accetta in ingresso anche disegni realizzati con AutoCAD. Esso consente di lavorare contemporaneamente su più finestre, con vista in pianta, sezioni ed assonometria. Consente di introdurre i principali elementi geometrici: pavimento, pareti, tetti, porte, finestre, ricevitori e sorgenti, cui può essere assegnato un orientamento. Ciò è importante soprattutto per sorgenti direttive. Alla fine il lavoro può essere salvato in un file con l'estensione .RAY oppure .DXF.

Aperto il programma Material Manager ci si ritrova in un ambiente di tipo "spreadsheet" che contiene i dati di assorbimento ed isolamento acustico dei materiali nelle 10 bande di frequenza considerate (da 31.5 a 16000 Hz).

Il Source Manager serve per generare e visualizzare i file che contengono i dati sulle sorgenti sonore (.SPK). Esso comprende anche un modulo, chiamato ISO 3744 (3746) per l'utilizzo diretto di dati di livello sonoro rilevati attorno ad una sorgente in accordo con le metodiche per la determinazione dei livelli di potenza sonora secondo le norme ISO citate. I dati della sorgente possono poi venire editati in forma tabellare, o visualizzati in forma grafica. Source Manager è infine in grado di importare file che contengono dati su altoparlanti provenienti dal programma Modeler della Bose Corporation.

Ramsete Trace esiste costituisce il tracciatore di piramidi vero e proprio.

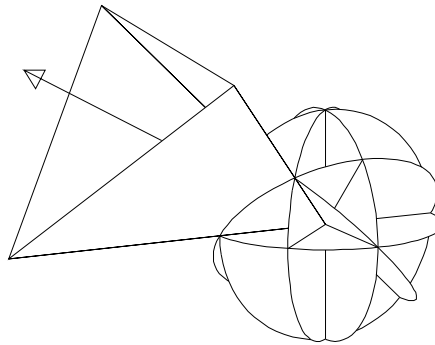
Ramsete View legge uno o più file elaborati da Ramsete Trace e consente di visualizzare in forma grafica le seguenti informazioni: risposta all'impulso in ciascun ricevitore; risposta integrata con Schroeder (curva di decadimento); spettro in ottave in ciascun punto ricevente; tabelle numeriche di tutti i dati (*SPL*, tempi di riverbero). Inoltre, da un lato consente di effettuare visualizzazioni tridimensionali prospettiche delle geometrie disegnate con Ramsete CAD o con AutoCAD, dall'altro di mappare in pianta o in prospettiva i risultati delle elaborazioni (livelli sonori, tempi di riverbero) e tutti i tipici parametri acustici. Nel primo modo di funzionamento si hanno a disposizione i comandi tipici di una macchina fotografica e si riescono ad ottenere visioni realistiche della geometria introdotta. È stato implementato un algoritmo di rendering per dare all'utente la possibilità di ottenere output grafici di livello professionale per la presentazione del proprio lavoro.

ALGORITMI DI CALCOLO

Il pacchetto Ramsete è stato sviluppato esplicitamente per risolvere tutte le limitazioni contenute nei sistemi di modellizzazione del campo sonoro in grandi ambienti, che attualmente sono più idonei allo studio dei teatri che degli ambienti industriali.

In particolare il tracciatore di piramidi implementato consente di tenere conto dell'effetto di diffrazione sul bordo libero delle schermature o degli ostacoli, e considera pure la quota di energia che passa attraverso le superfici (dotate di Potere Fonoisolante finito).

La generazione delle piramidi è perfettamente isotropa, mediante un algoritmo di progressiva bisezione degli 8 spicchi di partenza, come mostra la seguente figura:



Il tracciamento delle piramidi viene proseguito fino ad ordini elevatissimi (anche se è possibile limitarlo ad un ordine prefissato), in modo da ricostruire l'intera coda sonora, in ciascun punto ricevitore.

Come in tutti i tracciatori di fasci divergenti (beam tracing, cone tracing, etc.), la coda sonora tende ad essere sottostimata in campo riverberante, poichè al crescere delle dimensioni della base di ciascun fascio aumenta la probabilità di "perdere" una sorgente immagine. È pertanto necessario effettuare una correzione della coda sonora (che viceversa non era necessaria con algoritmi tipo "ray tracing").

Ramsete impiega una correzione della coda sonora di tipo moltiplicativo. Essa si basa sul fatto che il numero di impatti su un ricevitore nell'unità di tempo $n(t)$, ottenuto da un tracciatore di fasci divergenti, può essere descritto matematicamente, secondo Maercke/Martin, dalla relazione:

$$n(t) = \frac{4 \cdot \pi \cdot c_0^3 \cdot t^2}{V} \cdot \left(1 - e^{-\frac{l_{cm}^2 \cdot N}{4 \cdot c_0^2 \cdot \beta \cdot t^2}} \right) = \frac{4 \cdot \pi \cdot c_0^3 \cdot t^2}{V} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_c^2}{t^2}} \right) \quad (1)$$

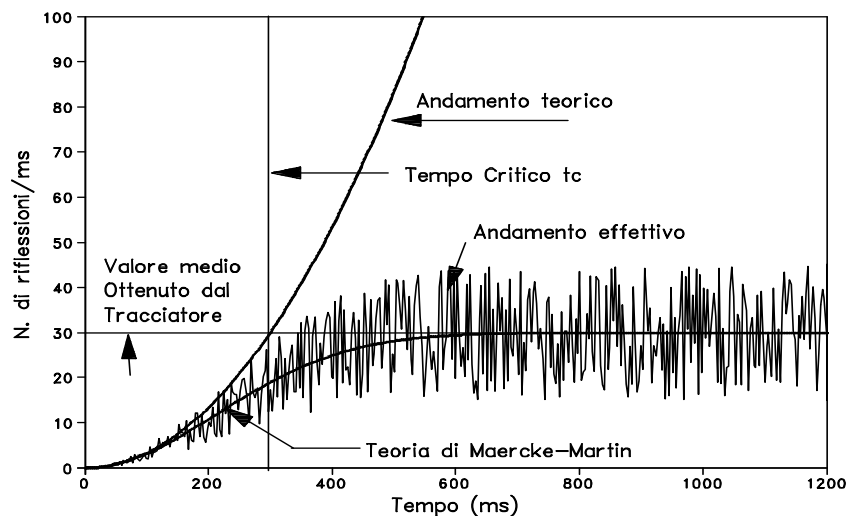
L'andamento teorico secondo la teoria delle sorgenti immagine è invece costituito semplicemente dal primo fattore della relazione suddetta, senza il termine fra parentesi, e pertanto cresce con il quadrato del tempo.

Al tendere all'infinito del tempo t , la relazione (1) fornisce poi un valore teoricamente costante del numero di impatti sul ricevitore nell'unità di tempo:

$$n(\infty) = \frac{N \cdot c_0 \cdot l_{cm^2}}{V} \cdot \frac{\pi}{4 \cdot \beta} \quad (2)$$

Nelle relazioni (1) e (2) compaiono due parametri dipendenti dalla natura del campo sonoro: il Libero Cammino Medio l_{cm} , che viene calcolato da Ramsete in base ad una statistica sull'effettiva percorrenza dei raggi sparati in asse alle piramidi, ed il coefficiente adimensionale β , che dipende

dalla natura più o meno sabiniana del campo sonoro (in campo perfettamente diffuso risulta $\beta = 0.3$). Il Tempo Critico t_c , che compare nella relazione (1), rappresenta il punto di ideale separazione fra la prima parte della coda sonora, in cui vengono rilevate correttamente tutte le sorgenti immagine, e la parte tardiva in cui il numero di arrivi di energia nell'unità di tempo è costante: esso è infatti definito come il punto di intersezione fra la parabola, corrispondente all'andamento teorico, e la retta orizzontale che rappresenta il numero costante di intercettazioni rappresentato dalla relazione (2). La seguente figura illustra una situazione reale, a confronto con le stime teoriche di cui sopra:



La correzione della coda riverberante viene dunque eseguita semplicemente dividendo l'energia sonora per il termine fra parentesi della relazione (1), che è sempre minore di 1 e va diminuendo progressivamente al crescere di t .

L'altro aspetto che differenzia il tracciatore piramidale di Ramsete dagli altri metodi di Beam Tracing è la possibilità di dichiarare "obstructing" alcune superfici. Quando una piramide colpisce una di queste superfici, vengono attivati ulteriori controlli, onde verificare se dietro di essa si trova un ricevitore. In tale caso, si calcola il contributo sullo stesso fornito dall'onda sonora che ha attraversato la superficie (in base al potere fonoisolante della stessa). Si verifica poi se la superficie presenta bordi liberi, ed in caso affermativo viene portato un ulteriore contributo di energia al ricevitore a partire da ciascun bordo libero, calcolato con la nota relazione di Keller/Maekawa.

Grazie a queste possibilità, l'algoritmo di tracciamento è in grado di affrontare lo studio della propagazione sonora anche in spazi geometricamente complessi, in presenza di schermature parziali o totali. È pure possibile valutare l'efficacia di cabine per la sosta degli operai, oppure prevedere l'emissione di rumore verso ricevitori esterni all'edificio.

Inoltre il modello è impiegabile anche nell'ambiente esterno, ad esempio per la verifica di schermature attorno a sorgenti fisse, purché la distanza dei ricevitori non sia così grande da dover considerare, oltre all'attenuazione dell'aria, anche effetti atmosferici che portino alla curvatura dei raggi sonori.

IMPIEGO DEL PROGRAMMA

Il metodo di progettazione con l'ausilio del pacchetto Ramsete si differenzia a seconda che l'intervento riguardi un'opera già esistente o ancora da costruire.

Nel primo caso occorrerà effettuare delle misure in loco, quali il tempo di riverbero e la mappatura dell'*SPL*, per poter, una volta inseriti i dati nel calcolatore, tarare il modello. Nel caso infatti di un intervento su costruzioni già esistenti, è bene sfruttare appieno la possibilità di studio dello stato di fatto, al fine di comprendere a fondo le problematiche specifiche dell'intervento e poter scegliere così le soluzioni più appropriate. Inoltre, partendo da una condizione reale e misurabile, facendo eseguire al calcolatore la stessa situazione (stato di fatto) e studiandone i risultati, si potrà verificare l'attendibilità del programma in quel caso specifico. Fermo restando poi che eventuali differenze fra i risultati sperimentali e quelli calcolati sono da imputarsi, non tanto al modello di calcolo, più volte testato, quanto ai dati che si sono forniti al calcolatore (geometria, materiali etc.), si ha la possibilità di tarare il programma, modificando appunto i dati in ingresso e la loro precisione, fino ad ottenere risultati congruenti con la realtà. Da questo punto in avanti il programma sarà affidabile e si potranno "prevedere" in tempi irrisori i risultati di un qualsiasi intervento semplicemente variando i dati in ingresso. A questo punto il processo di "progettazione iterativa", necessario in certi casi ma irrealizzabile in pratica, risulta possibile.

Nel caso in cui invece si stia lavorando quando ancora la costruzione non esiste, e quindi non si abbia la possibilità di effettuare misure, normalmente viene però richiesta una minore precisione dell'elaborazione; tramite la simulazione numerica sarà possibile all'acustico proporre un più ampio ventaglio di soluzioni progettuali, si conosceranno meglio le caratteristiche dei materiali da scegliere e si potrà stimare il beneficio ottenibile, anche se ovviamente i risultati avranno, in assenza di taratura, una minore precisione assoluta.

BIBLIOGRAFIA

- ✓ P. Galaverna, "Un nuovo approccio alla progettazione acustica: l'utilizzo di "Ramsete" per la previsione del campo sonoro in teatri, ambienti industriali ed ambiente esterno", In corso di pubblicazione Isolare CTA.
- ✓ A. Farina, P. Galaverna, G. Truffelli, "Ramsete: un nuovo software per la previsione del campo sonoro in teatri, ambienti industriali ed ambiente esterno", Tai del XXII Convegno Nazionale AIA, Leche, 1994.
- ✓ A. Farina, "Tecniche di convoluzione applicate al trattamento di segnali sonori per prove di ascolto", Tai del XXII Convegno Nazionale AIA, Leche, 1994.
- ✓ A. Farina, A. Cocchi, "Utilizzo di ex-chiese come sale polifunzionali: la chiesa di S. Lucia a Bologna", Tai del XVIII Convegno Nazionale AIA, L'Aquila, 18-20 Aprile 1990.
- ✓ A. Farina, "An example of adding spatial imprecision to record music: signal convolution with binaural impulse responses", Proceedings of Acoustics and Recovery of Spaces for Music, Ferrara, 27-28 October 1993.
- ✓ A. Farina, A. Cochi, "Correzione acustica di ex-chiese riadattate per utilizzo concertistico: un esempio di progettazione di interventi non Sabiniani con l'ausilio del calcolatore", Proceedings of Acoustics and Recovery of Spaces for Music, Ferrara, 27-28 October 1993.
- ✓ A. Cochi, A. Farina, P. Fausti, L. Tronchin, "Acoustic quality of theatres: correlation between experimental measures and subjective evaluations", In corso di pubblicazione su Acta Acustica.
- ✓ A. Cocchi, A. Farina., P. Fausti, M. Garai, G. Semprini, "New possibilities in room acoustics measurements: real-time analyzer, DAT, computer: a comparative approach", Proc. of 6th FASE Congress, Zurich, 29-31 July 1992.
- ✓ A. Farina, R. Pompoli, "Noise reduction in a Tractor Cab using resonators and active loudspeakers: FEM prediction and experimental verification", Proc. of 2nd ATA International Conference on Vehicle Comfort, Bologna, 14-16 October 1992.
- ✓ A. Farina, A. Cocchi, M. Garai, G. Semprini, "Old churches as concert halls: a non-sabinian approach to optimum design of acoustic correction", Proc. of 14th ICA, F5-7, Beijing, 3-10 September 1992.
- ✓ M. Kleiner, B. Dalenback, P. Svensson, "Auralization - an overview", AES Journal, vol. 41, no. 11, November 1993.
- ✓ B. Connolly, "A User Guide for the Lake FDP-1 plus", Lake DSP Pty. Ltd, Maroubra (Australia), September 1992.
- ✓ H.W. Gierlich, "The application of binaural technology", Applied Acoustics, vol. 36, no. 3&4, 1992.
- ✓ W. Ahnert, R. Feistel, "EARS Auralization Software", AES Journal vol. 41, no. 11, November 1993.
- ✓ Anechoic Orchestral Music Recording, DENON PG 6006, Nippon Columbia Limited, 1988.
- ✓ M.R. Schroeder, D. Gottlob, K.F. Siebrasse, "Comparative study of european concert halls: correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters", J.A.S.A., vol.56, pp. 1195, 1974.
- ✓ Y. Ando, "Concert Hall Acoustics", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1985.

- ✓ H. Lehnert, J. Blauert, "Principles of Binaural Room Simulation", *Applied Acoustics*, vol. 35, no. 3&4, 1992.
- ✓ J.P. Vian, J. Martin, "Binaural Room Acoustics Simulation: Practical Uses and Applications", *Applied Acoustics*, vol. 35, no. 3&4, 1992.
- ✓ K.H. Kuttruff, "Simulation Models for Auralization in Room Acoustics", *Proc. of 14th ICA*, F2-2, Beijing, 3-10 September 1992.
- ✓ B.I. Dalenback, P. Svensson, M. Kleiner, "Prediction and Auralization based on a combined Image Source/Ray Tracing Model", *Proc. of 14th ICA*, F2-7, Beijing, 3-10 September 1992.
- ✓ A.V. Oppenheim, R.W. Schaffer, "Digital Signal Processing", Prentice Hall, pp. 242, Englewood Cliffs (NJ), 1975.
- ✓ H. Moller, "Fundamentals of Binaural Technology", *Applied Acoustics*, vol. 36, no. 3&4, pp. 171, 1992.
- ✓ G.M. Naylor, "ODEON – Another Hybrid Room Acoustical Model", *Applied Acoustics*, vol. 38, no. 2-4, pp. 131, 1993.
- ✓ R. Tenenbaum, J. Slama, M. Ballesteros, "Numerical simulation of room acoustics: a new approach for source modelling", *Proc. of 14th ICA*, F6-11, Beijing, 3-10 September 1992.
- ✓ T. Lewers, "A combined Beam Tracing and Radiant Exchange Computer Model of Room Acoustics", *Applied Acoustics*, vol. 38, no. 2-4, pp. 161, 1993.
- ✓ L. Tronchin, "Qualità acustica nei teatri: analisi sperimentale e confronto con valutazioni soggettive in alcuni esempi italiani", *Tesi di Laurea Univ. Bologna*, A.A. 91/92, Relatore: A. Cocchi, Correlatori: L. Rocco e A. Farina.
- ✓ D. Botteldooren, "Time domain simulation of electronically controlled acoustic systems", *Prec. of FASE 1992*, Zurich, 29-31 July 1992.
- ✓ K.R. Fyfe, J.P. Coyette, "Acoustical design using the boundary element method", *Proc. of 2nd Int. Conference on Methodology and Innovation in Automotive Experimentation*, ATA, Firenze, 22-25 Novembre 1988.
- ✓ K. Jacob, T. Birkle, C. Ickler, "Microcomputer-based implementation of the Speech Transmission Index for large spaces", *J.A.S.A.*, vol. 87, S1, 1990.
- ✓ A. Krokstadt, S. Strom, S. Sorsdal, "Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique", *J. Sound Vib.* 8, pp. 118, 1968.
- ✓ A. London, "The determination of Reverberant Sound Absorption Coefficients from Acoustic Impedance Measurements", *J.A.S.A.*, vol. 22, no. 2, pp. 263-269, March 1950.
- ✓ M. Vorlander, "Simulation of the transient and steady state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm", *J.A.S.A.* 86 (1), pp. 172-178, July 1989.
- ✓ D. van Maercke, J. Martin, "The prediction of echograms and impulse responses within the Epidaure software", *Applied Acoustics*, vol. 38, no. 2-4, pp. 93, 1993.
- ✓ Timothy J. Foulkes, "Halls for Music Performance : another two decades of experience 1982 – 2002".
- ✓ V.M.A. Peutz, "The Variable Acoustics of the Espace de Projection of Ircam (Paris)". In *Proc. of the 59th AES Convention*, Preprint 1310, Hamburg (Germany), 1978.
- ✓ V.M.A. Peutz and B. Bernfeld, "Variable acoustics of the IRCAM concert halls in Paris", *Proc. 10th ICA* (Sidney), Abstract E1.3, 1980.
- ✓ R. Plomp, "Acoustical aspects of cocktail parties", *Acustica* 38, pp. 186-191, 1977.

- ✓ K. B. Ginn, "Architectural Acoustics", Brüel & Kjær, Denmark, 1978.
- ✓ F. Alton Everest, "Acustica", Hoepli, Milano, 1994.
- ✓ B. Abrami, A. Armani, I. Danieli, "Misura della Sensazione Sonora", Brüel & Kjær, 1978.
- ✓ E. Zwicker, H. Fastl, "Psychoacoustics", Springer-Verlag, Berlin, 1990.
- ✓ L. Beranek, "Acoustics", pp.425, Mc Graw-Hill, New York, 1954.
- ✓ J. Backus, "The Acoustical Foundations of Music", W.W. Norton & Company, Toronto, 1977
- ✓ L. L. Beranek, "Music, Acoustics and Architecture", pp. 488-489, Wiley, New York, 1962.
- ✓ J. S. Bradley, "Uniform Derivation of Optimum Conditions for Speech in Rooms" , Building Research Note No. 239, National Research Council of Canada, November 1985.
- ✓ L. Cremer and H.A. Muller, "Principles and Applications of Room Acoustics", vol. 1, pp. 610-627, Applied Science Publishers, Barking (England), 1978.
- ✓ V. O. Knudsen and C. M. Harris, "Acoustical Designing in Architecture", pp. 375 and 394, Wiley, New York, 1950.
- ✓ Z. Sü-Gül and M.Çalışkan, "Acoustical Design of Inner Galleries in Heydar Aliyev Center", Proceedings of 20th ICA, Sydney (Australia), 23-27 August 2010.
- ✓ M.Çalışkan, "Architectural Acoustics", Lecture Notes, IZOCAM Isolation Education Center, 2004.
- ✓ J.C.Jaffe, "Selective Reflection and Acoustic Coupling in Concert Hall Design, in Music & Concert Hall Acoustics", Conference Proceedings from MCHA, pp.85-94, Academic Press, New York, 1995.
- ✓ R. Johnson, E. Kahle, and R.ESSERT, "Variable Coupled Volume for Music Performance, in Music & Concert Hall Acoustics" Conference Proceedings from MCHA, pp.372-385, Academic Press, New York, 1995.
- ✓ Z. Sü, "Systematic Investigations on Energy Decays in Acoustically Coupled Spaces Using Scale-Model Technique", Master's Thesis, RPI, Troy, NY (USA), July 2006.
- ✓ M.Long, "Architectural Acoustics", Elsevier Academic Press, 2006.
- ✓ Leo Beranek, "Concert Hall and Opera Houses", Springer-Verlag, 2nd edition, New York, 2004.
- ✓ Paolo Galaverna, "L'acustica delle sale da concerto e per la fruizione del parlato", Backstage, no.22, Ed. Jackson, Dicembre 1999.
- ✓ Y. Ando, "Concert Hall Acoustics", Springer Verlag, 1985.
- ✓ R. Glasgal, K. Yates, "Ambiophonics: beyond surround sound to virtual sonic reality", Ambiophonics Institute, Rockleigh (NJ), 1995.
- ✓ A. Bruce Carlson, "Communication systems", McGraw-Hill international editions, 1986.
- ✓ A. V. Oppenheim, R. W. Schafer, "Elaborazione numerica dei Segnali", Franco Angeli, Milano (Italy), 11^{ma} edizione, 1996.
- ✓ D. F. Elliot and K.R.Rao, "Fast transformations: algorithms, analysis and application", Academic press, 1982.
- ✓ S. K. Mitra and J. F. Kaiser, "Handbook of digital signal processing", McGraw-Hill international editions, 1993.
- ✓ M. Karjalainen, E. Piirilä, A. Järvinen, "Loudspeaker Response Equalization Using Warped Digital Filters", Proc. NorSig-96, pp. 367-370, Espoo (Finland), 1996 Sept.
- ✓ A. Torger, A. Farina, "Real-Time Partitioned Convolution for Ambiophonics Surround Sound", 2001 IEEE Workshop on Application of Signal Processing to Audio and Acoustics, New Paltz

(NY), 21-24 October 2001.

- ✓ V. Lombardo, A. Valle, "Audio e Multimedia", Apogeo Education, ISBN 88-7303-986-3.
- ✓ M. A. Gerzon, "General metatheory of auditory localisation", AES Preprint, 92nd Convention, March 1992.
- ✓ M. A. Gerzon, "Perihpony: with height surround sound reproduction", Journal of Audio Engineering Society, vol. 21, pp. 2-10, Jan/Feb 1973.
- ✓ N. Prodi, "Sistemi di analisi e di sintesi per l'acustica delle sale teatrali", Tesi del Dottorato di Ricerca in Fisica Tecnica, XIII Ciclo, Università degli Studi di Bologna.
- ✓ J. N. Mourjopoulos, "Digital Equalization of Room Acoustics", JAES vol. 42, no.11, pp. 884-900, November 1994.
- ✓ O. Kirkeby, P. A. Nelson, H. Hamada, "The Stereo Dipole – A Virtual Source Imaging System Using Two Closely Spaced Loudspeakers" JEAS vol. 46, no. 5, pp. 387-395, May 1998.
- ✓ J. Baluert, "Spatial Hearing", The MIT Press, Cambridge, MA, 1983.
- ✓ A. Farina, P. Galaverna, M. Giabbani, "Il processo di auralizzazione: metodologia ed esemplificazione", Atti del Convegno: "L'acustica dei teatri storici: un bene culturale", Ferrara, 4 novembre 1998.
- ✓ A. Farina, R. Glasgal, E. Armelloni, A. Torger, "Ambiophonic Principles for Recording and Reproduction of surround Sound for Music", 19th AES Conference on Surround Sound: Techniques, Technology and Perception, Schloss Elmau (Germany), 21-24 June 2001.
- ✓ A. Farina, R. Ayalon, "Recording Concert Hall Acoustics for Posterity", Proceedings of AES 24th International Conference on Multichannel Audio, Banff (Canada), 26-28 June 2003.
- ✓ R. Miller, "Transforming Ambiophonic + Ambisonic 3D Surround Sound to & from 5.1/6.1", 114th AES Convention, Amsterdam, 22-25 March 2003.
- ✓ R. Miller, "Scalable Tri-play Recording for Stereo, ITU 5.1/6.1 2D, and Periphonic 3D (with Height) Compatible Surround Sound Reproduction", 115th AES Convention, New York, 10-13 October 2003.
- ✓ O. Kirkeby, P. A. Nelson, P. Rubak, A. Farina, "Design of Cross-talk Cancellation Networks by using Fast Deconvolution", 106th AES Convention, Munich, 8-11 May 1999.