

ALMA MATER STUDIORUM UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
Corso di Laurea in Ingegneria Edile

Insegnamento: ACUSTICA APPLICATA

Docente: Prof. Massimo Garai

CONSIDERAZIONI SULL'ACUSTICA DELLE SALE

Tesina di Alfonso Pezzi

A.A. 2001-2002
Copyright 2002-2003

Indice

Premessa	3
Il teatro greco e il mito dei vasi acustici.....	4
ITDG e tempo baricentrico	6
Tempo di Riverberazione	9
Chiarezza, IACC e prima energia laterale	14
La struttura di una sala da concerto	17
La forma della pianta	17
Il soffitto.....	20
Il sistema di terrazze	23
Il volume	24
Considerazioni sull’acustica dei teatri	26
Capienza.....	32
I palchi	32
Qualità acustiche della Scala e del “teatro all’italiana”	34
Bibliografia	40
Siti internet consultati.....	40

Premessa

Fisica + Arte = Musica Eccezionale

Scienza o mito , così inizia il libro sull' acustica architettonica di Leo Beranek, "*Music, Acoustics & Architecture* ". Il punto di partenza sarà proprio il mito, riportando il caso dei teatri greci e della loro (vera?) perfezione acustica.

La prima parte riguarderà i parametri oggettivi e soggettivi per la valutazione del comportamento acustico di una sala: il tempo di riverberazione che ha costituito fino agli anni cinquanta dello secolo scorso il principale e l'unico descrittore fisico. L'ISO 3382 lo ricorda come il predominante indicatore delle proprietà acustiche della sala. Sono stati considerati poi ITDG, LE, IACC, ulteriori parametri fisico-acustici, introdotti sin dagli anni '50. Sono stati presi in esame anche il tempo baricentrico e gli indici di chiarezza C_{80} e C_{50} . Sono state evidenziate relazioni fra queste grandezze misurabili e i criteri soggettivi di valutazione. Per ogni parametro sono stati riportati esempi.

Nella seconda parte, facendo riferimento alle più note sale da concerto, sparse per il mondo, sono esaminati i criteri progettuali che hanno informato la loro progettazione, la definizione della volumetria, la loro forma e alcuni accorgimenti tecnici.

La terza parte, muovendo dalle considerazioni precedenti, analizza lo sviluppo del teatro e cerca di capire le ragioni dell'eccellenza acustica di certe sale come il Teatro Alla Scala.

Il teatro greco e il mito dei vasi acustici¹

Associare l'acustica perfetta al teatro greco non è del tutto sbagliato, a patto che si definisca il concetto di acustica perfetta e si chiariscano i fini per cui vennero costruiti i teatri. I greci furono probabilmente i primi ad affrontare lo studio dei fenomeni sonori, prima con Pitagora (VI sec. a. C.) e poi Aristexenos (IV sec. a. C.) che opponeva la priorità della sensazione alla teoria matematica.

Il teatro era fabbricato a ridosso di una montagna, per ridurre il rumore diffuso, peraltro molto scarso, e in una posizione naturale favorevole per sfruttare le brezze ascendenti; era formato da una *cavea*, semicircolare e divisa in più settori, che consentiva di raccogliere il maggior numero di persone attorno all'orchestra e da un muro come fondale del proscenio per riflettere la voce in tutto il teatro e per eliminare eventuali rumori di fondo. Non è sempre facile capire quali sono le ragioni che hanno determinato certe forme, individuando quali fossero dettate da una precisa impostazione acustica e quali invece rispondessero a altre esigenze. A Catania, Magnesia e in altre città, sorsero nel V secolo teatri che avevano una forma trapezoidale, con le ali che convergevano nella scena, minimizzando il rimbombo, e creando un'orchestra di piccole dimensioni, impedendo in questo modo all'attore di allontanarsi dalla scena. Il più antico e famoso teatro semicircolare è quello di Epidauro, costruito nel 360 a. C. da Polykleitos: in questo, come in altri esempi, coesistono esigenze di ottica, acustica e condizionamenti di natura drammatica. La notevole grandezza di questa opera rispetto alle precedenti, 100 m di distanza fra palcoscenico e gradinate, obbligarono l'architetto a apportare alcune sostanziali modifiche. Il proscenio sopraelevato a causa della maggiore altezza della cavea e la presenza di un *logeion* sopra il proscenio, riservato al coro, formavano una alta struttura a telaio, tamponata con i "*pinakes*", riquadri di legno che riflettevano il suono in direzione del pubblico.

Si è generalmente creduto che gli attori recitassero con una grande intensità vocale. In molte performance indossavano maschere che, oltre a enfatizzare la drammaticità del ruolo interpretato, ospitavano dei piccoli megafoni che amplificavano la voce dell'attore.

¹ Enciclopedia dell'Arte, voce *Acustica*

Vitruvio ci riferisce nel ‘De Architectura’ di esperimenti circa l’acustica architettonica, rifacendosi al libro perduto di Aristoxenos e mettendo in luce l’esistenza, tutt’altro che certa, dei vasi acustici. Seguendo la tesi poco convincente di Vitruvio, questi vasi di bronzo venivano posti in maniera particolare nel teatro e funzionavano da risonatori per determinati accordi. Non è stata però rinvenuta nessuna traccia che ne dimostrasse l’effettiva esistenza. Certamente il medioevo riprese questa pratica e la applicò in molti edifici sparsi in Europa e in Italia, come nella chiesa bizantina della Panaghia di Rossano Calabro e in San Bartolomeo del Fossato a Sampierdarena. In tutti i casi affrontati, l’utilizzo di questi vasi era dettato più da una cieca fiducia che da un controllo degli effetti, attraverso l’esperienza. Ritroviamo questa perplessità nelle parole di Leon Battista Alberti, che manifesta qualche dubbio non solo sulla loro reale efficacia ma anche sulle modalità di applicazione: “ [...] cose forse facili a dirle, ma in che modo si potesse fare una cosa simile, lo sa chi ne ha fatto esperienza”.²

Ora in acustica edilizia si utilizzano i risonatori di Helmholtz, molto simili alle cavità assorbenti impiegate in passato, costituiti da un volume d’aria contenuto in un vuoto collegato con l’esterno attraverso un’apertura relativamente stretta, detta collo del risonatore. Quando un’onda sonora colpisce l’ingresso del risonatore, se le dimensioni della cavità sono piccole rispetto alla lunghezza d’onda, per frequenze relativamente basse, e se le dimensioni del collo sono piccole rispetto alla cavità, l’aria si comporta come un pistone oscillante mentre quella contenuta nella cavità costituisce l’elemento elastico. In altre parole, più banalmente, è come soffiare dentro una bottiglia e ... il suono che si ottiene è quello alla frequenza naturale del recipiente. Se la frequenza dell’onda incidente si aggira attorno alla frequenza del risonatore, la velocità delle particelle all’interno del volume assume valori molto elevati aumentando i fenomeni dissipativi. Se la frequenza si discosta molto da quella del risonatore, l’onda non esercita nessuna influenza. L’assorbimento è selettivo quindi in frequenza, particolarmente adatto al caso di toni puri compresi in un intervallo tra 40 e 400 Hz.³ Generalizzando, un ambiente confinato con una sola apertura e di dimensioni allungate potrebbe essere assimilato acusticamente a un gigantesco risonatore.

² Leon Battista Alberti, *De re aedificatoria*

³ Manuale di progettazione acustica, *Isolamento acustico*, pag. 416

Tralasciando i contributi degli eventuali accorgimenti tecnici presenti, per le rappresentazione di opere drammatiche, i teatri greci potevano vantare un' ottima acustica; sarebbe però impensabile proporre in questi luoghi la musica dell' '800 e del '900 che ha bisogno, per essere realizzata fedelmente agli intenti del compositore, della riflessione del suono dei muri perimetrali e del soffitto, cioè necessita di un tempo di riverberazione, che effettivamente manca nei teatri all'aperto.

ITDG e tempo baricentrico

L' *initial time delay gap* è uno dei principali problemi degli acustici ed è usualmente associato alla volumetria: più è grande il volume più è grande l' ITDG. Il suono avvertito per primo è il suono diretto, cioè quello che parte dallo strumento che lo ha prodotto, per esempio un violino, e che arriva direttamente all'ascoltatore. Qualche millesimo di secondo dopo, si percepisce l'onda riflessa dalle superfici che delimitano lo spazio in cui stanno la sorgente e il ricevitore. L'ITDG è quindi il tempo che intercorre fra l'arrivo del suono diretto e l'arrivo della prima onda riflessa. Il sistema uditivo tende a mescolare i due suoni se questi giungono separati da meno di 0,02 secondi, altrimenti i suoni verranno avvertiti separati o con un' eco se l' ITDG è superiore a 0,07 secondi.

Si può ritenere l' ITDG ideale quello compreso fra 0,02 o 0,03 secondi ⁴: se è troppo lungo, cioè da 0,04 a 0,07 secondi, si avrà la sensazione di essere in una caverna, come accade nella Royal Albert Hall a Londra.

Conoscendo questa differenza di tempo è possibile percepire qualitativamente la distanza delle superfici riflettenti e quindi la misura della sala: minore è l'ITDG e maggiore sarà l'*intimacy*. L'*intimacy*, infatti, seguendo la definizione di Beranek, è l'aspetto del suono che indica all'ascoltatore la grandezza dell'ambiente in cui il suono stesso è stato prodotto. E' chiaro che il compositore ragiona anche in termini di *intimacy*, quando concepisce la sua opera. La musica da camera, infatti, è stata composta per pochi strumenti e quindi per sale piccole; la musica sinfonica del '700 e del '800, suonata da molti musicisti, è adatta alle lunghe sale, come la *Grosser Musikvereinssal* (1870) di Vienna; la musica sacra e suoi cori richiedono ambienti grandi come le cattedrali. Progettare una sala da concerto significa anche sapere in anticipo che musica verrà suonata.

Contenere e minimizzare l'ITDG per avere un alto valore di *intimacy*, nel caso di volumi maggiori a 17.000 m^3 , pone all'acustico un problema di non facile soluzione. Non potendo cambiare il volume e le superfici della struttura, bisognerà intervenire sulle appendici per avere una maggiore "intimità": la *Philharmonic Hall at Lincoln Center* di New York, oltre 24.000 m^3 , e il *Tanglewood Music Shed* nel Massachusetts, 40.000 m^3 , possiedono dei pannelli, sospesi al soffitto, che riflettono il suono, diminuendo ITDG, senza sacrificare il tempo di riverberazione. Nel primo caso, i pannelli, disposti su due livelli, producono un ITDG al centro della platea di 0,02 secondi; senza, si ha un valore circa 0,04 secondi. Nel secondo caso, la larga pianta a ventaglio non consente di sfruttare le riflessioni laterali e la soluzione degli elementi riflettenti ha abbassato ITDG da 0,035 secondi a 0,019 secondi. Le aperture fra i pannelli permettono la circolazione del suono sopra di essi, non pregiudicando il buon tempo di riverberazione. Sempre impiegando i pannelli sospesi, nel caso di una sala con soffitto la cui altezza conferisce maestosità e solennità all'ambiente, si può pensare a un sistema elettromeccanico che muove queste appendici, abbassandole quando le luci sono spente e riportandole nella configurazione normale, più in alto, quando le luci sono accese.

Tecnicamente questi riflettori, affinché diffondano per riflessione, devono essere grandi quattro volte la lunghezza d'onda massima del suono incidente e avere un peso non inferiore a 15-20 kg/mq.

L'ITDG non solo influenza l'*intimacy*, ma anche la *texture*, la tessitura, cioè "l'impressione soggettiva creata nella mente dell'ascoltatore dal modo in cui la sequenza delle riflessioni arriva all'orecchio dell'ascoltatore stesso". Senza mettere in discussione la sua importanza nell'acustica di una sala, non è facile proporre una scala di valori per gli attributi acustici della tessitura, come invece accade per l'*intimacy*, per la vivezza, per l'assieme, per la diffusione o per il bilanciamento e per gli altri parametri soggettivi: si può solo sottolineare che le sale rettangolari sono più apprezzate da critici e musicisti.

Consideriamo ora "utile" una riflessione se giunge all'ascoltatore, rispetto all'onda diretta, in un tempo inferiore ai 75 millesimi di secondo. Alla luce di questa ipotesi, con una velocità di 340 m/s ⁵, si ha una differenza di percorso di circa 25 metri, condizione vincolante per l'altezza, per la forma dello spazio interno. La *Grosser*

⁴ L. L. Beranek, *Music, Acoustics & Architecture*, pagg. 418, 419

⁵ La velocità del suono cresce al crescere della temperatura, cioè $c = 331,6 + 0,6T_c$. Ponendo T_c pari a 20°C , si ottiene: $c = 342 \text{ m/s}$

Musikvereinssal ha un soffitto alto circa 15 metri una lunghezza di circa 35 metri e una larghezza ridotta di 20 metri. Se la sala è molto ampia, il percorso dell'onda riflessa verso il punto al centro della platea è maggiore: si può dire che le riflessioni ora danno un contributo negativo alla percezione del suono o del parlato. Tale distanza "utile" rappresenta un punto di equilibrio: se la sala è molto grande le ultime file saranno investite prevalentemente dal suono riverberato. L'intensità è sicuramente funzione della distanza dalla sorgente sonora, cioè dal palcoscenico, ma anche del tipo di superfici riflettenti e del numero dei musicisti.

Con l'ITDG conosciamo il tempo di ritardo della prima onda riflessa ma non conosciamo i tempi con cui arrivano le successive onde. In altri termini, può accadere che una sala abbia un ITDG breve senza avere molte riflessioni per i successivi 60 millisecondi: in questo caso una significativa quantità di energia non viene veicolata dalle prime riflessioni ma da quelle successive. Si introduce il tempo baricentrico o centrale, t_s , inteso come il rapporto fra l'energia dell'intero decadimento pesata nel tempo e l'energia complessiva.

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

Si ritiene generalmente valido:

- $t_s < 50$ ms per il parlato
- $50 \text{ ms} < t_s < 140$ ms per la musica ⁶

Il Teatro Alla Scala, il Teatro La Pergola e il Teatro Comunale di Bologna hanno valori abbastanza simili, rispettivamente 107 ms, 98 ms, 113 ms. La Sala Europa di Bologna, progettata per dibattiti e conferenze ha un tempo baricentrico di 56 ms, leggermente più alto di quello richiesto. Le dimensioni ridotte e l'eccessiva riverberazione di Poggio Imperiale non facilitano la comprensione delle parole e delle note: il suo tempo centrale t_s è pari a 150 ms, superiore al tempo limite per un'ottima percezione della chiarezza ($t_s=140$ ms).

⁶ Renato Spagnolo, *Manuale di Acustica*, pag. 705

Tempo di Riverberazione

Il tempo di riverberazione, scoperto da Sabine, espresso in secondi e non in millesimi di secondo come l'ITDG, è un altro parametro da considerare nella progettazione acustica. « Se i muri e il soffitto non sono assorbenti, cioè non sono costruiti con materiali porosi o foderati da stoffe fonoassorbenti, non solo il suono viene riflesso dalle superfici che delimitano lo spazio, ma viene trasmesso da parete a parete, passando per le orecchie dell'ascoltatore molte volte in un secondo ».⁷ Il suono perde energia sia nel passaggio della struttura muraria sia attraversando la sala; il suono quindi muore con rapidità o lentezza, a seconda delle proprietà fonoassorbenti dei materiali. Tecnicamente, T_{60} è definito come il tempo che impiega un suono a decadere di 60 dB, dopo che la sorgente sonora si è interrotta bruscamente. Osservando la curva di decadimento si nota che spesso l'andamento non è propriamente lineare perché molto spesso l'ambiente non è sabiniano. La curva si presta però a essere linearizzata. Si scelgono due punti caratteristici e si traccia la retta: per esempio nel T_{20} , i due punti scelti sono -5 e -25 dB. Se si considerasse un decadimento di soli 10 dB si avrebbe l'EDT che è ottenuto rapportando a -60 dB la pendenza media dei primi 10 dB: l'EDT è molto influenzato dall'intensità delle prime riflessioni. Nel caso dei 60 dB si deve tenere conto dell'importanza del rumore di fondo che si sovrappone al processo di estinzione del suono; con T_{30} invece, estrapolando sempre a -60 dB la pendenza media dei primi 30 dB, si ha un valore ottimale, "più sicuro" perché lontano dalle incertezze del primo e dell'ultimo tratto.⁸

Operativamente, dalla curva di decadimento si calcola il tempo a -5 dB e il tempo a -35 dB. Il tempo di decadimento (30 dB) sarà la differenza tra queste due quantità. Per avere delle misure confrontabili, moltiplicheremo questo tempo per 2 e avremo il tempo di decadimento di 60 dB. Dalla definizione di RT, presa dalla ISO 3382, il tempo di decadimento appena calcolato rappresenta T_{30} , dove 30 rappresenta il range dinamico considerato.

Se la sala fosse sabiniana, condizione che difficilmente si presenta, tutti i valori del tempo di riverberazione T (EDT, T_{20} , T_{30}), sarebbero uguali. Tutte le volte che ciò

⁷ L. L. Beranek, *op. cit.*, pagg. 28, 29

⁸ La norma ISO 3382, pag. 2, recita: "Usando un range fra -5 dB e -25 dB, il risultato che si ottiene, RT20, può essere labile e similmente per altri range".

non accade è opportuno controllare il rapporto EDT/T: T dipende dalle proprietà fisiche della sala, mentre EDT è sensibile alla riverberazione percepita soggettivamente.

Il tempo ideale di riverberazione dipende dal tipo di musica suonata: con organo e coro, il miglior tempo di riverberazione è di 3 o 4 s, per la musica romantica, cioè Wagner, l'ultimo Beethoven, o Brahms, 2 s, per Debussy e la musica contemporanea circa 1,6 s. Nei teatri, la forte presenza del parlato richiede la chiarezza e quindi un tempo di riverberazione di 1 sec. Un importante aspetto è appunto la flessibilità: l'opera lirica esige un tempo di riverberazione per il parlato compreso possibilmente fra 1,2 s e 1,5 s. e per la sua parte musicale circa 1,8 s.

Una sala riverberante è una sala “viva”. Al contrario, se ha un basso tempo di riverberazione, per l'alto coefficiente di assorbimento dei materiali di cui è composta, allora è asciutta o “morta”. La vivezza, “*liveness*”, strettamente collegata alla riverberazione alle medie-alte frequenze, in una sala aggiunge una maggiore pienezza di toni alla musica, contribuisce alla comprensibilità dei *crescendo* e *decrescendo*. Si ha la sensazione che il suono sia distribuito in tutta la sala e non provenga da un'unica sorgente. Guardando i dati riferiti si può dire che le migliori sale del mondo, *Grosser Musikvereinssaal* (T=2,05 s), *Concertgebouw* (T=2,0 s), *Symphony Hall* (T=1,8 s) sono sale molto vive. Il fatto che queste siano vive e che abbiano valori di T simili non significa che rispondano in maniera uguale ad ogni tipo di spettacolo. In altre parole, c'è chi preferisce la sala viennese per la musica romantica ma non per Bach, oppure chi pensa che il violino suoni meglio al *Concertgebouw* (1895) di Amsterdam.

All'opposto, la sala più “morta” è la *Old Festspielhaus* di Salisburgo, con un tempo di riverberazione, in presenza di pubblico, pari a 1,0 secondi mentre la mediocre *Royal Festival Hall* presenta un T uguale a 1.5 secondi. Si considera perciò una sala “dry” se questa presenta valori di T inferiori a 1.6 secondi. Ma l'aggettivo “dry” non necessariamente va inteso in senso spregiativo. Un locale troppo poco riverberante per un concerto sinfonico può presentare un'acustica adatta per certa musica da camera o per le suonate per pianoforte.

“*Warmth*”, invece, può essere definita come la vivezza alle basse frequenze, cioè la ricchezza dei bassi; si ha un suono “caldo” quando il tempo di riverberazione alle basse frequenze è più alto che alle medie. Per valutare questa caratteristica in maniera rigorosa, si fa riferimento al rapporto fra il tempo di riverberazione alle basse frequenze e il tempo

di riverberazione alle medie (T_{250}/T_{mid} e T_{125}/T_{mid}). E' fondamentale analizzare T in funzione della frequenza. Un ambiente che è riverberante alle alte frequenze non lo è necessariamente anche alle basse: ci può essere vivezza senza calore. Inoltre, un alto tempo di riverberazione alle alte frequenze può rendere il suono aspro o duro. Osservando i risultati e ascoltando i critici, si evince che l'auditorium di Boston è eccellente anche alle basse frequenze ($T_{250}/T_{mid}= 1,11$ e $T_{125}/T_{mid}= 1,22$) mentre la sala viennese risulta un po' più carente di bassi . Si conferma invece mediocre la Royal Festival Hall ($T_{250}/T_{mid}=0,9$ e $T_{125}/T_{mid}=0,86$). RT non deve oscillare liberamente, ma deve essere contenuto. Basandosi sui valori del T(500Hz), il T(250Hz), alle basse frequenze, dovrà essere $1,4T(500)$ e T(2kHz) uguale a $0,8T(500)$. Utilizzando i dati a disposizione e immaginando che non vi sia un apprezzabile differenza fra T15 e T10 (EDT), di cui non possediamo l'andamento in frequenza, si può fare un esempio: il teatro Verdi di Firenze (EDT=1,4) ha un'ottima ricchezza di bassi ($T_{15(ideale)} = 1,96$ s, $T_{15(misurato)}$ è circa 2 s) ma sembra essere un po' troppo vivo alle alte frequenze ($T_{15(ideale)}=1,1$ s, $T_{15(misurato)}$ circa uguale a 1,5 s).

Il “miraggio” progettuale che sottende l' ideazione di un auditorium, che può arrivare a costare 150 milioni di dollari, è creare uno spazio unico e molteplice, unico perché la struttura che ospita lo spettacolo sia sempre la medesima e molteplice perché possa accogliere più tipi di manifestazioni nell'arco di uno stesso mese. A conferma di quanto appena detto, nel 1960 un gruppo di architetti lanciò una sfida per la costruzione di un edificio che potesse ospitare ogni genere di musica , dai concerti sinfonici ai musical americani, dal teatro all' opera lirica. Il risultato fu sfortunato e sconsolante. L' auditorium risultò troppo riverberante per il parlato e troppo poco per la musica, un compromesso che finì per non servire bene nessuna funzione. Si doveva intervenire per migliorare la flessibilità nel rispetto di certi parametri acustici ; muovendo, per esempio, un gran numero di tendaggi, si riduceva il tempo di riverberazione, aumentando le prestazioni e la flessibilità. « All' *Ambassador Auditorium*, l'interno ha un falso soffitto forato, e sopra questo, invisibile agli spettatori, un' enorme intercapedine che per le conferenze viene riempita da materiale assorbente in modo da ridurre il tempo di riverberazione a 1 secondo e durante gli eventi musicali si libera l'intercapedine, riportando la sala a 1,6 s di T ».⁹

⁹ <http://www.angelfire.com/music2/davidbundler/acoustics.html>

Rifacendosi alle considerazioni conclusive del capitolo precedente, si ribadisce che nelle migliori sale il suono arriva all'ascoltatore con la giusta intensità, nel miglior bilanciamento fra suono diretto e riverberato. La condizione di cui si era data la giustificazione in termini di percorso del suono diretto, viene rispettata nelle sale di prim'ordine: a Boston e alla Scala poco più di 19 metri, a Vienna 18 metri.¹⁰ Superare questa distanza sia in altezza che in pianta significa avere posti in cui manca il contributo del suono diretto. L'energia riflessa darà un contributo significativo se sarà superiore del 10 % di quella diretta.

Pensando l'intensità soggettiva, *loudness*, del suono riverberato, proporzionale al rapporto fra il tempo di riverberazione a una media frequenza con spettatori e il volume della sala ($loudness = T/V$), a parità di T , il volume è inversamente proporzionale all'intensità soggettiva che, a guisa di quanto dice Beranek, è necessaria per rendere efficaci i passaggi di *fortissimo*. Se però la sala è piccola e T è alto, tale intensità potrebbe offendere l'udito degli ascoltatori, mentre se ha un grande volume e non è molto riverberante rende poco nei *fortissimo* poiché fa solo affidamento al suono diretto. Il tipo di performance, quindi, influenza la forma e il volume della struttura. Non è pensabile, infatti, progettare un buon auditorium per i grandi eventi e che possa al tempo stesso ospitare, per esempio, la musica sperimentale di Nono, di Boulez o di Stockhausen. Appositamente, infatti, per la rappresentazione del Prometeo di Nono, si è costruito a Akiyoshidai, nel 1998, l' *International art village*.

E' una struttura complessa che comprende, oltre ad aule seminariali e ambienti di lavoro e un teatro all'aperto, una sala da concerti per 400 posti, giudicata dai critici molto interessante. L'opera prevede la collocazione del direttore dell'orchestra non al centro della sala e gli spazi per il coro, per i solisti, per il narratore i percussionisti in punti diversi e sospesi nel vuoto; al centro la consolle per il controllo dell'elettronica e gli altoparlanti disposti in cerchio, sospesi.

¹⁰ Beranek attribuisce il massimo del punteggio quando la distanza fra il centro della platea e l'orchestra è pari a 60 piedi, cioè 18 metri.



Hollywood Bowl



International art village



Fukushima Concert Hall ha un tempo di riverberazione , 3 s, adatta alla musica sacra barocca e all'organo e un valore della chiarezza raccomandabile per la musica classica romantica

Non c'è nulla di convenzionale: lo spazio è frantumato, è diviso in “isole” a formare “arcipelaghi” che dialogano attraverso lo spazio vuoto che verrà riempito dagli spettatori. I cosiddetti “vuoti” corrispondono ai silenzi della partitura e l' “arcipelago” alla filosofia di Massimo Cacciari che ha curato il libretto del Prometeo. Riprendendo la relazione tecnica: “ A differenza di quanto accade nei teatri tradizionali, dove le poltrone sono allineate di fronte al palcoscenico e si adattano a uno spazio omogeneo, i posti nel *teatro Akiyoshidai* possono venir cambiati e le isole e gli spettatori possono essere spostati a diversi livelli e in direzioni diverse sino a galleggiare nell'aria: la rappresentazione può aver luogo ovunque e gli spettatori possono essere distribuiti di conseguenza”.

All'aperto, dove T è circa zero, l'intensità di un'orchestra dipenderà dall'intensità del suono diretto e dalla vicinanza dello spettatore ai musicisti. Su questa semplice constatazione trova la sua giustificazione un altro moderno teatro all'aperto, progettato per fare affidamento alle sole onde sonore provenienti dal palcoscenico, *Hollywood Bowl*, capace di 22.500 spettatori, ricavato, come nella tradizione greca, in una grande cavità naturale, nelle montagne tra S. Fernando Valley e Hollywood. L'uniformità della pressione sonora è garantita da un riflettore acustico ,sopra la scena, che dirige verso la platea il suono, evitando che nell'ultime file si abbiano spiacevoli cadute di intensità. Per ridurre l'effetto dell'assorbimento prodotto dal passaggio radente dell'energia sonora sul

pubblico, non solo è consigliabile alzare il livello della scena ma anche inclinare il piano d'appoggio delle poltrone.

E' uno dei casi in cui le ragioni acustiche sono intimamente connesse alla necessità di garantire in ogni posto la migliore visibilità possibile. Tenuto conto dell'altezza della sorgente e di una differenza minima tra la posizione della testa e degli occhi di due file consecutive di ascoltatori si è in grado di calcolare la distanza massima alla quale è possibile mantenere orizzontali le poltrone della platea. Nel caso la lunghezza della sala non sia sufficiente a contenere i posti richiesti, è necessario inclinare il piano d'appoggio delle poltrone: nella costruzione grafica per ottenere la forma del piano d'appoggio interviene un nuovo parametro, l'angolo determinato dall'inclinazione della superficie che garantisce una visibilità minima per gli spettatori che occupano le ultime file.

Un ulteriore attributo soggettivo è la chiarezza, *clarity*. Si utilizza questo termine quando il suono è pulito e distinto. Nonostante la semplicità della sua definizione la chiarezza è attributo complesso che dipende da altri fattori. E' funzione della capacità riflettente delle superfici cioè dell'ITDG, del tempo di riverberazione, della distanza dell'ascoltatore dalla sorgente e dal volume. In altre parole è strettamente connesso con quattro importanti attributi, rispettivamente *intimacy*, *liveness*, *loudness*, *loudness of reverberant sound*.

Chiarezza, IACC e prima energia laterale

Si è accennato come il t_s sia legato alla chiarezza. Da esperienze condotte da vari studiosi si è evinto che le migliori sale sono quelle in cui le prime riflessioni laterali, prodotte dalle pareti e che giungono all'ascoltatore entro un certo tempo, si bilanciano e si equilibrano bene con il suono diretto, separando quindi le riflessioni che aiutano il suono da quelle che, in ritardo, lo sporcano. Il logaritmo del rapporto fra l'energia nei primi 80 ms e l'energia di tutte le successive riflessioni viene definito chiarezza (C_{80} , Reichart). La chiarezza è legata al sistema delle riflessioni e maggiore è la chiarezza maggiore è la nitidezza, cioè la trasparenza del segnale. Studi condotti da Reichardt mostrarono che il limite dapprima imposto per calcolare la definizione (50 ms) era strettamente riferito al parlato. Infatti per quanto riguarda la musica, da test svolti con la collaborazione di ascoltatori, venne in risalto che il limite di percezione del suono utile

non era 50 ms, ma andava spostato a 80 ms. E' stato quindi definita la chiarezza, utilizzata quindi per usi musicali, che è definita come:

$$C_{50} = 10 \cdot \log \frac{\int_{50ms}^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{50ms}^{\infty} p^2(t) dt} \qquad C_{80} = 10 \cdot \log \frac{\int_{80ms}^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt}$$

Per il C_{80} e il C_{50} i valori di riferimento sono per il parlato quelli maggiori o uguali di 3 dB mentre per la musica compresi fra -4 dB e 2 dB¹¹. Per i teatri d'opera, il C_{80} e il C_{50} della Scala sono rispettivamente -0.11 dB e 3.8 dB, quelli del Teatro Comunale di Firenze 4,2 dB e 1,7 dB mentre quelli della Sala Europa sono 6,0 dB e 3,4 dB. I valori elevati rilevati nella Sala Europa bene si accordano con la sua funzione di sala conferenze mentre quelli del Teatro Comunale, spazio pensato per la lirica, sono abbastanza elevati soprattutto il C_{80} , maggiore di 2 dB rispetto a quello desiderabile per la musica e molto più elevato di quello ottimale della Scala. Si può sviluppare una sorta di ulteriore suddivisione dei valori relativi alla musica, operata da Nagata :si avranno dei valori ottimali per la musica classica sinfonica (da -2 dB a 2 dB) e ottimali per la musica classica romantica (-5 dB a -1 dB) . Il C_{80} del *Tokyo Bunka Kaikan* è circa 0, quindi adatto alla musica di Beethoven e Haydn, quello del *Fukushima Concert Hall* (vedere foto) è circa 3 dB, perciò più raccomandabile per suonare e ascoltare la musica di Mendelssohn e Brahms. Le storiche sale di Vienna, Amsterdam e Boston hanno un C_{80} rispettivamente di -3,7 dB, -3,3 dB e -2,7 dB.

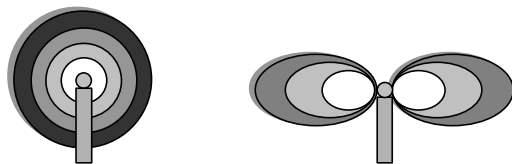
Per migliorare la chiarezza di uno spazio si dovrà aumentare la prima energia, cioè quella che arriva entro gli ottanta millesimi di secondi iniziali, a scapito di quella che arriva successivamente. Dotare di una superficie assorbente le superfici più lontane dalla sorgente significa diminuire la quantità di energia “dannosa”, cioè si impedisce che la struttura immetta nuovamente nell'uditorio energia negativa sotto forma di onde riflesse che giungono allo spettatore con eccessivo ritardo (superiore a 80 ms).

Nel ascolto della musica di grande importanza è l' impressione spaziale, cioè la diversa percezione, in termini di diversa pressione, di ciascun orecchio.. L'impressione spaziale è quella sensazione di essere immersi nel suono. Negli ultimi trent'anni (Marshall e Barron) si sono identificati due aspetti di questa spazialità: *Apparent Source*

¹¹ Renato Spagnolo, *op. cit.*, p.745

Width (ASW) e *Listener Envelopment* (LE). Il primo termine si propone di spiegare, con il contributo delle frequenze più alte, la percezione ampia e allargata della sorgente sonora, il secondo termine invece rende conto, con la parte inferiore dello spettro, di come lo spettatore si senta avvolto dalla musica. In termini più rigorosi, la differenza fra i due termini sta ancora nel tempo di arrivo delle riflessioni laterali: il primo è funzione delle prime riflessioni, cioè quelle che arrivano entro 80 ms mentre il secondo è funzione delle successive riflessioni.

Ci sono molte grandezze che spiegano il meccanismo di percezione: *Early lateral energy* (L_f), *Lateral Energy Fraction* (L_{fc}), *Interaural Cross-Correlation Coefficient* (IACC). La prima misura prende in considerazione la frazione di energia che arriva nei primi 80ms dalla direzione laterale.¹² L_{fc} è il rapporto, espresso in percentuale, fra l'energia del suono che arriva lateralmente nell'arco temporale da 5 ms a 80 ms rispetto all'energia totale, compreso il contributo dato dall'energia veicolata dal suono diretto e frontale, da ogni direzione, nei primi 80 ms. L' *efficienza laterale*¹³, LE, è un ulteriore parametro, strettamente correlato con l'impressione spaziale, ed è molto simile a L_f , con la differenza che la finestra temporale relativa all'energia a numeratore è per LE tra 25 e 80ms.

 <p>Andamenti caratteristici di microfoni sferici e ad otto.</p>		
$L_f = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_8^2 dt}{\int_0^{80} p_0^2 dt}$ <p><i>Early lateral energy</i></p>	$L_{fc} = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_8^2 dt}{\int_0^{80} p_0^2 dt}$ <p><i>Lateral Energy Fraction</i></p>	$L_e = \frac{\int_{25ms}^{\infty} p_8^2 dt}{\int_0^{\infty} p_0^2 dt}$ <p><i>Efficienza Laterale</i></p>

Sperimentalmente, per entrambe le quantità, è il confronto fra la risposta di un microfono con diagramma di direttività a otto, orientato con la minore sensibilità verso la sorgente (cioè il microfono è sensibile all'energia laterale e poco influenzato dal suono diretto), e quella di un microfono omnidirezionale. Esiste comunque una differenza

¹² ISO 3382, pag. 15

¹³ Renato Spagnolo, *op. cit.*, pag.711

sostanziale: in L_{fc} l'energia è pesata con il coseno dell'angolo mentre in L_f è la pressione sonora che è pesata con il coseno dell'angolo. L_f varierà con il quadrato del coseno dell'angolo. Come recita la norma ISO 3382, L_{fc} rappresenta una valida alternativa al L_f ed è “stata pensata per essere soggettivamente più accurata”¹⁴ Il valore di L_{fc} che deve essere ottenuto per avere una buona impressione spaziale è di 0,2 GrosserMusikvereinssal e Concertgebouw poco meno di 0,2 e Symphony Hall di Boston circa 0,2 .¹⁵

Un alto valore di L_f e un basso valore di IACC significano un gran senso di spazialità. La Scala, il Teatro La Pergola e Poggio Imperiale hanno IACC simili, rispettivamente 0,22 , 0,17 , 0,21. L'uso di IACC però non è uniformemente accettato. Come nel caso di L_f e L_{fc} , il suo impiego e la sua soggettiva rilevanza è ancora oggetto di ricerche e studi.¹⁶

Pertinente alle metodiche di misurazioni giapponesi, questa misura si effettua con microfoni binaurali da indossare sul capo in modo che i due microfoni stereo siano posti in corrispondenza delle orecchie.

La struttura di una sala da concerto

La forma della pianta

La scelta del tipo pianta, che per le sale da concerto può essere a ventaglio (*fan shaped*) o rettangolare (*shoebox*) oppure a vigneto (*vineyard*), gioca un ruolo fondamentale. La sala rettangolare ,di genesi ottocentesca, e ancora oggi molto impiegata, “addolcita”, per esempio, nella *Meyerson Hall* (foto pag. 15) a Dallas e evidente in molti concert hall costruiti in Giappone¹⁷, (*Katusika symphony hills Mozart hall* di Tokyo), permette di avere valori dell'ITDG dell'ordine dei 0,02 s, e circa 5 riflessioni, uniformemente spaziate, in 60 millesimi di secondi dall' arrivo del suono diretto.

¹⁴ ISO 3382, pag.20

¹⁵ I valori trovati sono riferiti alle medie frequenze per bande d'ottava

¹⁶ ISO 3382, pag. 20

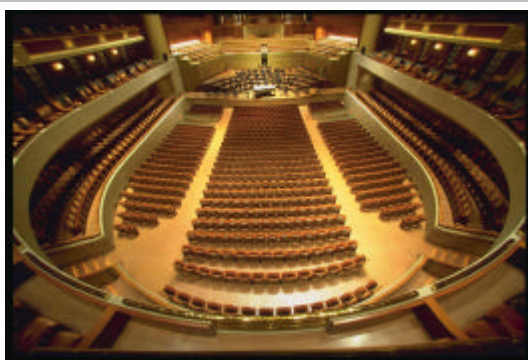
¹⁷ <http://www.nagata.co.jp>

Il sito, che si rifà all'esperienze dell' acustico M. Nagata , autore di *Properties and Subjective Impression of Tokio Concert Halls*, offre una ricca documentazione testuale e fotografica ,associata all' iter progettuale relativo alle sale da concerto giapponesi. Il sito è continuamente aggiornato.

L' auditorium a ventaglio, comune fra gli anni '20 e '60, è stato un insuccesso quasi ovunque, eccetto la celebrata *Tanglewood Music Shed*, ritenuta ottima da Beranek che qui è stato, peraltro, l'autore di una decisiva ristrutturazione acustica.

La maggiore difficoltà che insorge con questo tipo di scelta è l' alto valore di ITDG, dell'ordine dei 30 millesimi di secondo, e l'eventualità che non vi siano tre riflessioni entro 60 millesimi di secondo. Un problema difficile da risolvere in questo tipo di sale è l'eco, soprattutto quando il muro che le delimita posteriormente è un arco di cerchio che ha il centro nel palcoscenico.

Proprio perché si determinerebbe un ritardo nell'arrivo dell'onda riflessa, può essere utile applicare alla parete retrostante un rivestimento di materiale molto assorbente tale da rimandare meno energia riflessa possibile, minimizzando le conseguenze del ritardo dell'onda, fattore intrinseco alla morfologia della sala.



Meyerson Hall, interno



Filarmonica , Berlino, interno



Katusika symphony hills Mozart hall,



Opera House, acustica e architettura non trovano
un punto d'incontro

Un'altra forma esaltata negli ultimi anni è l'arena: *Christchurch Town Hall* (1972) in Neo Zelanda ne è un esempio. Ultimamente ci si è orientati per le soluzioni miste: nella *Aichi prefectural art theater* si è unita la notevole acustica delle sale che hanno una

configurazione rettangolare e la sensazione di unità fra orchestra e pubblico tipica delle sale ad arena.

Al contrario, sono sfavoriti quegli spazi che partono da una pianta ellittica, ad esempio la *Royal Albert Hall* a Londra: la forma della pianta non generosa, unita al volume gigantesco, dieci volte superiore alla media, determina una diminuzione considerevole dell'intensità del suono.

Molte volte però i capricci estetici degli architetti e gli esperimenti degli acustici prendono il sopravvento come nella *Segerstrom Hall* in Costa Mesa, California. La forma base è sempre a ventaglio, anche se molto modificata, con superfici verticali riflettenti che attraversano l'auditorium. Nonostante l'aspetto evochi suggestioni degne di "Star Wars", la sala, secondo il giudizio dei critici, può vantare una buona presenza.

L'auditorium a vigneto, impiegato molto recentemente nell'*Oriental Concert Hall* di Shangay, similissima per impostazione alla più nota *Filarmonica* di Berlino (1953-1963), risulta particolarmente utile quando il numero degli spettatori è così elevato da richiedere dimensioni in pianta tanto grandi da impedire l'arrivo di energia utile dalle pareti laterali. L'edificio berlinese di Hans Scharoun fu un successo sia per l'ottima acustica, sia per la novità del linguaggio formale, con piani sospesi e incuneati gli uni agli altri. Può capitare che la forma, l'aspetto, diventi un'icona tale da far passare in secondo piano le performance sonore della sala stessa.

L'*Opera House* di Sidney (vedere foto), con i suoi mille significati, veri o presunti, è stata considerata un capolavoro del linguaggio architettonico moderno ma, al contempo, non è stata capace di essere, acusticamente, all'altezza delle esigenze, forse per certi volumi "sfortunati" e sicuramente per le scelte legate alla standardizzazione degli elementi costruttivi. Può anche capitare che si confonda la bontà della sala con ciò che essa riesce a evocare: si sono messe in relazione le qualità dell'auditorium di Renzo Piano a Roma con la sola forma a liuto che pare caratterizzarlo internamente. Si opponga a questa visione "giornalistica", il fatto che l'*Opera House* dovesse suggerire il comportamento sonoro delle conchiglie e ciò non fu sufficiente all'architetto Jorn Utzon e all'ingegnere Ove Arup a garantire un buon ascolto.

Come si è già accennato, analizzando le reazioni degli ascoltatori e collegando tali risultati con le proprietà fisiche e acustiche delle sale stesse, si è scoperto che gli ascoltatori preferiscono quelle lunghe e strette, rispetto a quelle ampie e corte. Nel primo

tipo, alle orecchie dell' ascoltatore arriva prima il suono che proviene direttamente dal palcoscenico; l'onda successiva è quella riflessa dalla superficie più vicina, cioè dai muri longitudinali che producono un segnale leggermente diverso all'orecchio destro e a quello sinistro, sia a causa del loro differente contenuto sia perché giungono all'orecchie sfasate nel tempo. Il cervello avverte la dissomiglianza fra le pressioni sonore e lo spettatore apprezza la qualità spaziale della sala. Nel secondo tipo, è il soffitto che riflette l'onda e produce un segnale simile a entrambe le orecchie; in questo modo mancherà la spazialità e non si avrà l'impressione di essere immersi nel suono come invece accade nelle sale lunghe e rettangolari di antica concezione. Il rischio maggiore di questa opzione sta nella non perfetta uniformità della pressione acustica: questa opzione tende a privilegiare i punti più periferici, lasciando senza riflessioni laterali le parti centrali.

Il soffitto

La riflessione frontale del soffitto viene integrata dall'organo dell'udito con l'onda diretta nel determinare la sensazione dell'intensità sonora totale mentre le riflessioni laterali determinano l'impressione spaziale. Si è visto che il soffitto influenza l'impressione spaziale e l'ITDG. Un profilo sbagliato, accoppiato a un tempo di riverberazione non alto, può generare un'eco. Con queste ipotesi, il primo suono riflesso che viene percepito è quello che proviene da "dietro", cioè quello che, in virtù della maggiore distanza dall'ascoltatore, è il responsabile del disturbo. Un soffitto discontinuo e muri irregolari redirigono il suono e fanno sì che la sala risponda immediatamente. Anche i soffitti a cupola contribuiscono negativamente alla percezione della musica perché non distribuiscono uniformemente il suono. Nella *Royal Albert Hall* per impedire che il suono riflesso dalla cupola in vetro e alluminio deteriorasse ulteriormente il suono diretto si è applicata una struttura in lana di roccia: questo intervento pare abbia ridotto molto l'eco.

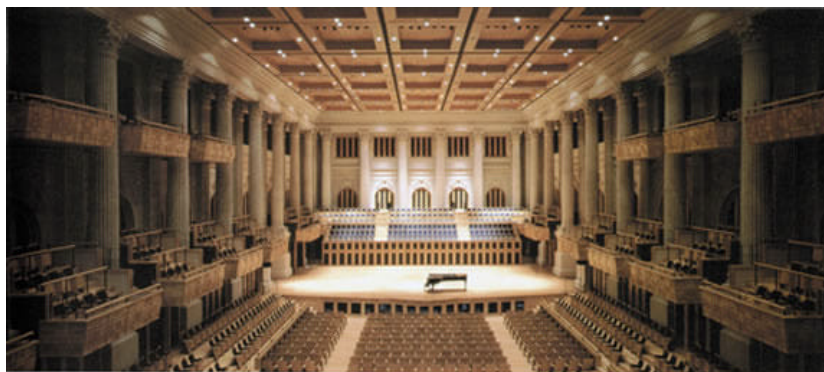
Il sistema già accennato dei pannelli sospesi aiuta a ridurre l'ITDG e a evitare focalizzazioni come nei soffitti curvi. Questo accorgimento non sarebbe utile nella *Herkulesaal* di Monaco perché la sala, simile alla *Gr. Musikvereinssall*, è lunga e stretta e ha un ITDG basso. Il problema che declassa questo auditorium è invece l'assorbimento selettivo in frequenza del soffitto: sarebbe opportuno sostituire il sottile paramento di

legno e lana di roccia ,separato dalla struttura da un'intercapedine d'aria, con un semplice rivestimento di intonaco.

Nella recentissima (1999) sala rettangolare di São Paulo (vedere foto) in Brasile la caratteristica acustica è proprio la copertura: anche in questo caso, i pannelli in legno, perfettamente inseriti in un soffitto a cassettoni, possono essere alzati o abbassati all'occorrenza. Così il grande direttore d'orchestra, Lorin Maazel ha giudicato la sala: *“To the new hall in São Paulo, congratulations are in order: Lovely Sound”*.

Ormai la studio delle riflessioni dal soffitto o dai muri perimetrali viene effettuato attraverso il computer. Più precisamente, dagli anni '80 il modello in scala che era il tradizionale strumento per la progettazione della sala è stato sostituito, in parte o totalmente, dal calcolatore, inaugurando così un nuovo corso. Ad esempio, «*La Sigyn Hall* (1994), Turku, un' eccezionale struttura vetrata che si inserisce perfettamente nel contesto finnico e gode di un'ottima acustica, è stata interamente progettata al computer.¹⁸

Il modello elettronico, costruito numericamente da dati (input) relativi alle superfici e alle caratteristiche dei materiali che si intendono usare, consente una maggiore rapidità della “costruzione” del modello stesso, l'analisi dei dati di output in tempi brevi e

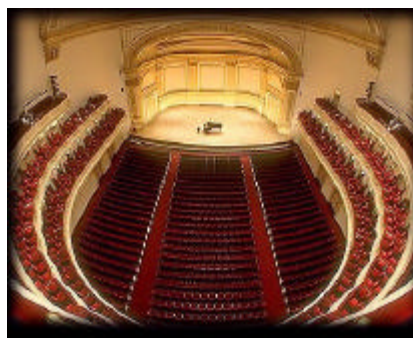


São Paulo, interno

¹⁸ http://www.safa.fi/ark/ark_96/acoustics.html



Modello in scala, *Teatro degli Arcimboldi*
Vista dei balconi, nella versione definitiva



Carnegie Hall. In molte parti il suono è eccezionale, in altre imperfetto. Per esempio, la prima galleria non riceve il suono dal soffitto e l'apertura non è sufficientemente ampia

permette di introdurre varianti senza decisivi stravolgimenti. In certi casi si può passare a prove analogiche, con un suono vero, su modelli di grande scala. A costruzione ultimata, si verifica il raggiungimento degli obiettivi e si possono confrontare le previsioni ottenute con il computer e il modello in scala. Nel caso del *Teatro degli Arcimboldi*, tale confronto ha dimostrato l'efficienza del modello elettronico e la sua precisione nel determinare preventivamente certe quantità, come il tempo baricentrico e la chiarezza.

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 pannello parzialmente aperto che continua oltre la sede dell'orchestra e copre le prime file della platea può rappresentare, in linea del tutto generale, un buon sistema. La superficie al di sotto di questo pannello deve essere fatta in modo tale da riflettere il suono da una parte all'altra dell'orchestra e da dirigere il suono proveniente dagli strumenti posti nelle ultime file verso la platea. Solitamente la parete che sta dietro i musicisti è intonacata e il pavimento è in legno sopra un'intercapedine d'aria, a formare una trappola per i bassi.

Nel nuovo teatro milanese, la fossa è a una quota inferiore di 2,5 m rispetto al piano del palcoscenico e è composta da due pedane mobili in legno: al di sotto uno spazio vuoto di identico volume, una cavità risonante come nei teatri di fine ottocento.

Nel tentativo di abbassare l'alta riverberazione alle basse frequenze, utile per l'insieme ma che può causare un rimbombo nel sale più piccole, si approfittare di questo volume, più o meno grande, per inserirvi stoffe o altri materiali fonoassorbenti. Tale tecnica può risultare poco utile se i materiali che rivestono il resto dell'ambiente sono molto riflettenti.

Il sistema di terrazze

In alcune sale molto capienti, per evitare una notevole distanza fra l'orchestra e l'ultima fila di spettatori, e quindi cadute di intensità, si prevede uno o più balconi, cioè strutture aggettanti poste sopra la platea. Qualsiasi sia il loro numero e la loro grandezza, si dovrà tenere conto che le persone sedute sotto una terrazza non ricevono il suono riflesso dal soffitto e che, se la profondità di questa è molto accentuata e l'apertura non è abbastanza ampia, anche il suono diretto può arrivare attutito.¹⁹ Comunque, in una sala ben progettata non ci sono molte differenze riguardo la qualità del suono, a seconda che lo spettatore abbia un posto nel palcoscenico oppure in una terrazza. In alcune sale che hanno un soffitto particolarmente alto, non sedersi vicino al palcoscenico può essere un vantaggio a causa della maggiore distanza dal soffitto e, di conseguenza, un maggiore ritardo nella ricezione delle onde riflesse dal soffitto.²⁰

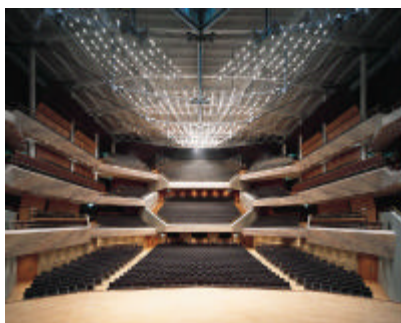
Al *Carnegie Hall* di NY (vedere foto) e alla *Royal Albert Hall* i balconi sono molto aggettanti e “incassati”: una porzione esigua di suono riflesso arriverà fino alle ultime file che dovranno fare affidamento esclusivamente al suono diretto. Il balcone termina con un parapetto che deve essere studiato per aumentare la diffusione del suono e evitare indesiderati echi nella platea. Per impedire che il suono venga riflesso in avanti, verso la fossa e le prime file, nella *Sala della Musica* a Lafayette o nell'auditorium a Detroit, per esempio, tale superficie viene trattata alla stregua della parete terminale, e, nella fattispecie, con un elemento metallico che copre 7 centimetri di materiale fonoassorbente (lana minerale).

¹⁹ L. L. Beranek, *Music, Acoustics & architecture*, 1962, pagg 462-464

²⁰ Se l'ascoltatore desidera percepire il suono allo stesso modo dei musicisti, allora, il posto migliore è davanti o dietro l'orchestra, dove l'intensità sonora è superiore che in altre posizioni.

Il volume

Un altro aspetto, solitamente definito dalla committenza, che informa un auditorium è la capienza, fattore in cui convergono aspetti economici, sociali, politici che poco hanno da spartire con l'acustica. Statisticamente, le recenti sale da concerto non ospitano più di 2500 spettatori: la *Brigewater Hall* a Manchester o la *Katusika Symphony Hall* di Tokyo o la *Disney Hall* di Los Angeles (in costruzione).



Brigewater Hall, interno



Casals Hall, interno

Questo nuovo corso dell'architettura è in netto antagonismo con la vecchia abitudine, tipica dei paesi fuori dall'Europa continentale, di costruire auditorium che possano accogliere almeno 2500 persone: *Tanglewood Music Shed* a Lenox, nel Massachusetts, può ospitare 6000 spettatori, *Royal Albert Hall* di Londra conta 6080 posti, *Makuhari Messe Event Hall* a Chiba 9000 persone, il *Metropolitan* di New York, 3639 posti.

Il crescente numero di spettatori implica, frequentemente, la scelta di un sistema elettronico di rinforzo del suono: l'auditorium diventa acusticamente assistito. Si può quantificare questo spartiacque fra di due tipi di sale nel numero di 2500÷3000 posti. Da un lato, quindi, l'esigenza di costruire strutture che possano accogliere molti spettatori e performance diverse, giustificando il loro considerevole costo, e, dall'altro, i problemi di natura acustica, connessi con la grandezza dell'involucro. Si potrebbe dire che capienza e versatilità sono inversamente proporzionali.

Un uso polivalente

Si tratterà 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 m^3 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 ».²¹

Per garantire un uso polivalente, il progettista dovrà intervenire sul tempo di riverberazione, gestendo la collocazione di materiale fonoassorbente e controllando che la pressione acustica rimanga uniforme. Per esempio, nel caso che le superfici siano altamente riflettenti, si può risolvere il problema dell'assorbimento alle medie e alte frequenze e dell'ottimizzazione della risposta acustica della sala usando materiali meno riflettenti.

²¹ Renzo Piano, *Giornale di bordo*, Passigli editore, pag. 232

Considerazioni sull'acustica dei teatri

Cenni storici e fenomenologia dello stile

“ esco ora dalla Scala...
E' per me il primo teatro
del mondo, perché è quello
che procura dalla musica i
maggiori piaceri...
Quanto all'architettura, è
impossibile immaginare nulla di
più grande, più solenne e nuovo ”
Stendhal, 26 settembre 1816

Quanto testè detto non può essere applicato al teatro d'opera il cui sviluppo ha seguito direttrici completamente diverse. Nato anticamente per allestire manifestazioni che prendevano spunto da fatti quotidiani, era ricavato nelle grandi sale dei palazzi oppure in una piazza o in un bel cortile. Si incominciano a vedere i primi spazi fissi, un primitivo palcoscenico, e, divisi da pochi strumentisti, gli spettatori, quando il melodramma richiede un luogo che rispetti le esigenze canore degli attori. Di questi teatri, costruzioni alcune volte impegnative, progettate da ingegneri come il Buontalenti, non rimane più traccia.

Il *Teatro Olimpico* (foto della cavea, pag. 24) di Palladio a Vicenza è la cerniera fra l'antico e il moderno: non più aperto e semicircolare bensì semiellittico e chiuso (anche se l'affresco nel soffitto mostra un cielo azzurro e nuvole) da un soffitto piano, con ripida gradinata che arriva fino al colonnato. La sala è piccola e l'acustica molto buona, il suono è brillante e c'è una significativa diffusione dovuta alla presenza delle sculture e delle ricche decorazioni. Geniale è lo scenario fisso, aldilà del palcoscenico: un sofisticato sistema di passaggi ristretti e la pendenza ascensionale data al retroscena concedono allo spettatore la sensazione di essere immerso in un dedalo di strade profondissime, le sette strade di Tebe.

Si fanno altri passi in avanti nella ricerca di una concezione definitiva di teatro, prima, con la sala costruita dallo Scamozzi a Sabbioneta nel 1589 e soprattutto poi con il *Teatro di Parma* di G. B. Aleotti d'Argenta il Farnese nel 1618 (inaugurato dieci anni più tardi). Qui l'Aleotti compì il suo capolavoro, distaccandosi molto dai precedenti modelli e affrancandosi dall'“ingombrante” Teatro Olimpico. L'ambiente molto vasto rese problematica la ricerca di una buona acustica nonostante la superficie sgombra della platea rafforzasse il suono delle voci e il finto loggiato ligneo diminuisse l'eco per il suo alto coefficiente di assorbimento. Alla grandiosità, alla novità compositiva e allo

splendore non fece seguito un impiego appropriato. A parte la spettacolare naumachia del 1716 nella platea allagata, questo grandioso teatro vide solo 9 rappresentazioni in cent'anni. Il problema attualissimo dei costi e della complessità degli allestimenti ne intralciò il naturale sviluppo, limitandolo a sede di liete ricorrenze e a nozze.

La sala solitamente era a U o rettangolare nei casi di allestimenti provvisori; si impiegava solitamente il legno, facilmente reperibile e strutturalmente efficace. Questo materiale era però, assieme al pericoloso sistema di illuminazione, causa di molti incendi ...tanto che, molto più tardi, l'ente che promosse la costruzione del Teatro Fenice richiese "*dagli architetti un particolare studio*", della struttura rendendola meno esposta con un sistema di "*pronti e facili ripari*".

Nel 1657 viene inaugurato il *Teatro La Pergola* di Firenze: un T_{30} di 1,2 secondi, particolarmente adatto alla musica lirica, e un ottimo valore dell' ITDG, circa 0,016 secondi, giustificabile con le piccole dimensioni del locale.²² Vent'anni dopo apre il *Teatro del Giglio* di Lucca (1675): la forma a ferro di cavallo (*foto, pag. 24*) è opera di Buonamici e Padreddio²³.

Sulla forma della pianta gli architetti continuano a spendere molte risorse, aumentando anno dopo anno il repertorio formale del teatro italiano: nel 1676, Carlo Fontana introduce nel teatro romano di Tordinona lo schema ellittico e il Patte si fa paladino di questa forma, sostenendone la priorità rispetto ad altre piante, adducendo, per quell'epoca, precise argomentazioni acustiche. « In uno dei due fuochi dell'ellisse della pianta», sostiene il Patte, « sta la sorgente e nell'altro si ha una concentrazione di suono che costituisce una nuova sorgente, ad uso degli ascoltatori più lontani dal palcoscenico». «Inoltre», continua l'architetto, «le onde prodotte da una campana sono sferiche, quelle prodotte dal suono della voce sono ellissoidali, perché orientate».

Nel 1740 viene inaugurato il *Teatro Regio* di Torino (*pianta, pag. 24*). Costruito con una spesa enorme, aveva ben 139 palchetti distribuiti su cinque ordini, per una capienza complessiva di circa 2.500 posti. La grande sala ellittica disegnata dall'Alfieri,

²² Angelo Farina, *Acoustic quality of theatres*, Università di Parma, 2002

I dati relativi al teatro La Pergola, Comunale di Firenze e Bologna e La Scala sono riportati nel sito internet <http://pcangelo.eng.unipr.it/Public/Papers/156-AppliedAcoustics2001.pdf>

²³ www.teatrodelgiglio.it/ Dal sito, il Teatro misurava "sessanta braccia di lunghezza, ventisette da mezzogiorno e ventiquattro da settentrione di larghezza, e sedici di altezza; ebbe prospettiva in muratura, il palcoscenico largo quanto la sala e lungo dieci braccia; due ingressi e tre ordini di palchi o stanzini, innalzati su colonne di pietra, tutti in ugual modo semplicemente arredati, tranne quello di mezzo che fu ornato con decoro per accogliere gli eccellentissimi signori di governo".

oggetto di ammirazione di molti viaggiatori, si ispira ai prestigiosi edifici teatrali europei. Il teatro subirà alcuni interventi; la sostituzione degli ultimi due ordini di palchi con le gallerie, prescritto per ragioni di ordine pubblico, finì per migliorare anche l'acustica e portò la capienza a tremila posti; inoltre, l'adozione dei tramezzi curvati, secondo porzioni di cerchi concentrici con il palco reale, voleva evitare gli angoli acuti capaci di guastare il suono. Nel 1936 un incendio distrugge il teatro.

Tutto lascerebbe presagire che la forma ottimale sia proprio questa, ma Tomaso Landriani, traducendo l'opera del Patte, oppone la buona acustica del Teatro Alla Scala e rilancia la supremazia della pianta a ferro di cavallo.



La comparsa del nuovo ceto di spettatori, sistemati nella platea dove le vecchie panche di legno (quando c'erano!!!) lasciano il posto alle seggiole, offre un nuovo spunto per lo sviluppo del teatro e l'abbandono di alcune soluzioni antiche. In seguito al trasformarsi della platea in un'area di grande dispersione sonora, a causa dell'alto coefficiente di assorbimento delle stoffe degli abiti degli spettatori, viene attribuita grande importanza al soffitto come struttura riflettente. Il teatro trova l'assetto definitivo

spostando l'orchestra dalla sala, dove procurava un po' di fastidio agli spettatori che le erano a ridosso, in buca.

Inaugurato nel 1764, il *Teatro Comunale* di Bologna, ha la stessa forma del teatro *La Pergola* ma prestazioni diverse: un valore del T15 di circa 1,7 s, ma un valore molto basso dell'ITDG, solo 14 millesimi di secondo. Qualche anno dopo, nel 1778, si costruisce a Milano il *Teatro Alla Scala* (vedere illustrazioni della pianta e di una vista dell'interno) su progetto di Piermarini, consulente (solo per la facciata?) anche per il *Teatro Verdi* di Trieste²⁴ (1801). La sistemazione interna del teatro triestino si deve a Gian Antonio Selva, autore anche del *Teatro Fenice* di Venezia. Lo schema da adottare rimane ancora un problema scottante, come a Jesi., nel *Teatro della Concordia*, ora *Pergolesi*, (1790): l'imolese Cosimo Morelli, noto al tempo per i suoi progetti a Forlì, Imola, Macerata e per la sua sconfitta a Venezia, vince la sua sfida contro l'altro architetto designato dalla committenza e opta per una sala caratterizzata da un'ampia curva ellittica²⁵. Situazione analoga a Venezia: Pistocchi pensa a una sala a gradoni che arriva fino al palco "pepiano" e colonne giganti che ritmano la curva dei palchi, da lui definita "sferoide"; più audace la forma basilicale del Bianchi, una fusione fra la chiesa e il teatro che accoglie i palchi secondo la spirale logaritmica già impiegata alla Scala.

Nel 1890 si apre il *Teatro Bellini* (pianta pag.26) di Catania firmato da Carlo Sada, autore anche del notissimo teatro Colòn di Buenos Aires.

Nel 1897, dopo una gestazione lunga vent'anni, termina la costruzione *Teatro Massimo* di Palermo. "La sala degli spettacoli a ferro di cavallo dell'architetto Basile, con una superficie pari a quella dei Teatri di Vienna e Parigi e una lunghezza (26,50 m. circa) superiore alle precedenti, fu concepita secondo il modello del teatro all'italiana con file di logge suddivise in palchi indipendenti e disposti secondo precisi calcoli di acustica e di visibilità. Quest'ultima favorita dal piano della sala inclinato di quattro gradi verso il palcoscenico che a sua volta ha una pendenza inversa, cioè dal fondo verso la ribalta"²⁶. E' grandioso anche il palcoscenico, largo oltre 38 m e profondo quasi 29 m, per una superficie totale, compreso il retropalco, pari a 1214 m².

La forma a ferro di cavallo consente al pubblico di avvicinarsi maggiormente alla scena, percepire distintamente la voce dei cantanti in virtù della maggiore intensità del

²⁴ <http://www.teatroverdi-trieste.com>.

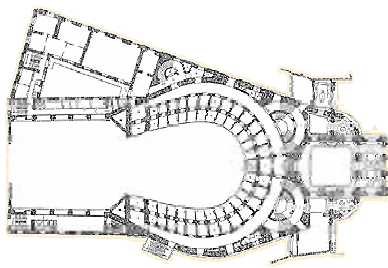
²⁵ <http://www.teatropergolesi.org/storia.htm>

²⁶ <http://www.teatromassimo.it>

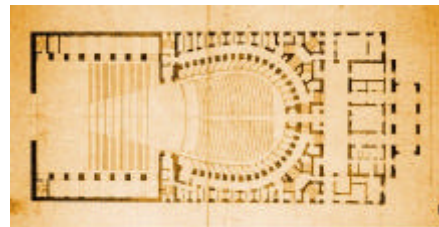
suono diretto su quello riverberato; si potrebbe dire che è la migliore risposta alle esigenze della opera all'italiana.

L'opera lirica, non wagneriana, impone requisiti acustici molto diversi dalla musica sinfonica o da camera. Per mantenere intelligibile il libretto, cioè la parte vocale che è una forma di comunicazione non così diversa dal parlato, specialmente nei veloci duetti di Mozart e Rossini, la riverberazione deve essere relativamente breve, circa 1,2 secondi, come Alla Scala, affinché le successive sillabe non siano mascherate dalla riverberazione di quelle immediatamente precedenti.

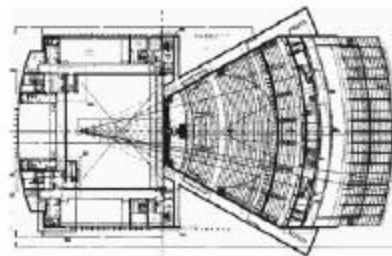
In contrapposizione a quanto detto fino a ora sul teatro, sta la *Festspielhaus* di Wagner, icona perpetua non solo per il valore architettonico e acustico ma anche per l'ideologia che sottende la sua ideazione. E' un'opera inusuale e modernissima perché



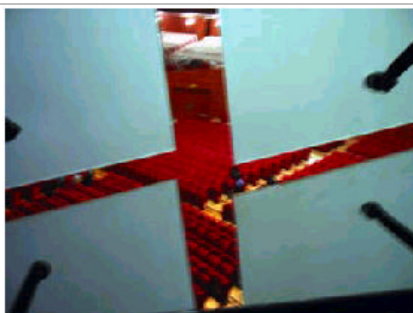
Teatro Bellini, pianta



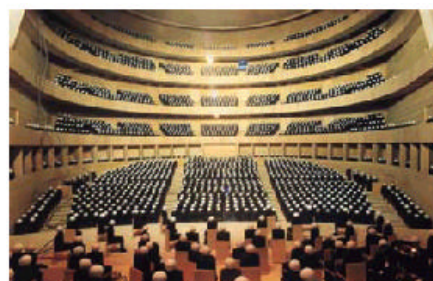
Teatro Alla Scala, pianta



Teatro degli Arcimboldi, pianta



Pannelli riflettenti laterali,
Teatro degli Arcimboldi



Moderna interpretazione del teatro
all'italiana (prima versione non realizzata),
Teatro degli Arcimboldi

rivoluzionaria era l'idea di porsi in netta antitesi con il teatro borghese e aristocratico “che offriva alla società lo specchio fedele della sua artificiosa struttura”.

La speranza di poter progettare un luogo adatto a rappresentare i propri componimenti nella maniera più fedele possibile porta Wagner, che aveva solo 25 anni, a pensare a un teatro adatto (esclusivamente) alla sua musica, e, nel 1876, il sogno si traduce in realtà: il teatro risponderà bene solo alla musica del suo Maestro e il *Parsifal* avrà trovato la sua casa. La pianta non è a ferro di cavallo bensì a ventaglio, ma con i muri laterali paralleli e non convergenti nel palco. Una serie di avancorpi dei muri laterali, dotati di colonne e trabeazione, rendono la sala (*foto, pag.24*) progressivamente più ampia e consentono la disposizione delle sedie a ventaglio: è una sala circa quadrata con una disposizione “a gradinata” dei posti a sedere a cui si adatta anche la parete di fronte al palco, non rettilinea e ortogonale alle pareti laterali, ma ad arco di cerchio che ha il centro nel palcoscenico.

Il soffitto della Festspielhaus è alto, garantendo così un tempo di riverberazione lungo, più lungo di qualsiasi altro teatro d'opera: 1,6 secondi alle medie frequenze con il teatro occupato dalle persone (1,3 secondi nello Staatsoper, 1,1 secondi sia per il Covent Garden che per l'Opera di Parigi).

Il recentissimo *Teatro degli Arcimboldi* sembra riproporre tutte le incertezze e le inquietudini fin qui riportate: la difficoltà di creare uno spazio valido sia per la musica sinfonica che per la musica lirica, le scelte tormentate sulla forma, il fattore economico che influenza l'iter progettuale, la scelta dei materiali.

La prima versione (vedere modello), infatti, prevedeva una pianta cilindrica, con i palchi, che riprendeva la forma classica dei teatri all'italiana e consentiva la creazione di uno spazio di 2400 posti raccolto attorno al palcoscenico, garantendo una buona intensità e diffusione. La seconda e definitiva soluzione (vedere pianta,) è a ventaglio, o meglio un compromesso fra una struttura simile alla Festspielhaus e una tipica del teatro classico, con l'aggiunta di 3 terrazze; in realtà è il risultato della modificazione della prima scelta, inserendo una porzione di cerchio in uno stretto triangolo. Il problema, già citato, che nasce con le strutture a ventaglio, è il rinforzo delle riflessioni laterali. Un sistema di pannelli riflettenti (vedere particolare,) sulle superfici laterali e sul soffitto, prima di vetro, poi, di legno, diffondono il suono su tutta la platea.

Capienza

Si ripete per i teatri la tendenza d'oltreoceano a costruire strutture molto più grandi di quelle presenti in Europa. La Scala contiene 2289 posti, 154 non numerati da cui il palcoscenico non può essere visto, molti rispetto alla media dei teatri d'opera europei (circa 1600 posti) : lo Staatsoper ne conta 1658, l'Opéra di Parigi 2131, il Covent Garden 2180, Bayreuth può ospitare solo 1800 spettatori, il Teatro Carlo Felice a Genova e il Teatro Bellini di Catania 1400, il Teatro Massimo di Palermo 2228, il Teatro Verdi di Trieste 1400²⁷. Negli Stati Uniti, i teatri d'opera sono molto più capienti, il Metropolitan di New York 3639 posti, l'Eastman Theatre a Rochester 3347, perché solo più di 2500 posti garantirebbe una convenienza economica tale da giustificare la costruzione e l'ammortamento delle scene. Esiste un limite superiore quantificabile attorno alle 4000 persone, dovuto all'esigenza acustica di mantenere lo spettatore il più vicino possibile alla scena. Ma non rimane costante il rapporto fra spazio utilizzato e posti a sedere, S_a/N_a , soprattutto nei moderni teatri americani dove gli standard per il comfort e la sicurezza richiedono valori di S_a/N_a più alti di quelli riscontrati negli antichi teatri europei: La Scala offre per posto a sedere $0,52 \text{ m}^2$, l'angusto Bayreuth solo $0,44 \text{ m}^2$, l'Opéra $0,50 \text{ m}^2$. Ecco perché per costruire un nuovo teatro che possa ospitare un numero di spettatori non superiore a 2500 (quantità che si ripete anche per le sale da concerto), come per esempio, nel teatro Colón di Buenos Aires, si deve progettare un volume 20 % più grande per ottenere lo stesso tempo di riverberazione.

I palchi

Dei gloriosi teatri italiani che videro i trionfi di diversi capolavori, molti sono andati distrutti, altri sono inagibili e quelli rimasti spesso risultano inadatti a ospitare le nuove opere: i ricchi spalti, le decorazioni dorate, i lampadari lussuosi e gli antichi fasti non si sposano con la creatività elettronica e computerizzata degli autori moderni. Ma nella continua metamorfosi che coinvolge il teatro, l'unica cosa che sembra non cambiare è il palco, spazio chiuso che garantiva un' assoluta *privacy*, *privacy* che aveva portato alla creazione dei *séparée*, anche nella galleria. I palchetti potevano, all'occorrenza, tirare una tendina e ripararsi da occhi indiscreti. Era una postazione privilegiata da cui poter

vedere la scena e osservare con il binocolo gli amici, i conoscenti, le belle donne; è luogo di potere e di affari, in cui è successo di tutto, applaudito, fischiato, mangiato e bevuto e, probabilmente, amoreggiato.

Molti di coloro che non avevano la fortuna di possederne uno, guardando dalla platea i palchi, si saranno probabilmente chiesti ,con pruriginosa curiosità e con una piccola dose di invidia, cosa accadesse al loro interno quando si abbassavano le tendine di taffetà.²⁸ In virtù della proprietà esclusiva, ad ogni palchettista era lasciata la libertà di allestire l'interno del proprio palco richiedendo all'esterno l'uniformità per i drappaggi e le cortine. Di norma, i palchi avevano la soffittatura in tela e le pareti in legno erano tappezzate di tela di Vienna in vari colori, ma prevalentemente in rosso, bianco o celeste. Alla Scala, questa varietà è testimoniata in alcuni palchi (*foto pag. 32*) sul lato sinistro del primo e secondo ordine, tuttora conservati nel loro aspetto originale.

Nei teatri d'opera si deve fare attenzione all'acustica dei palchi se si considera che questi ospitano quasi il doppio dei posti in platea e che la loro superficie è circa la metà di quella totale: nel teatro Alla Scala si contano 1359 posti contro 776 della platea; allo Staatsoper 1119 contro 467; all' Opéra 1344 contro 787; a Bayreuth ci sono solo posti in platea. I palchi possono essere considerati come terrazze se presentano dei semplici divisori fra le unità, come al Covent Garden. Nella struttura milanese, i palchi invece sono unità autonome e si adattano forzatamente alla pianta "a ferro di cavallo", assumendo una forma strozzata, le aperture sono più piccole e gli ambienti più angusti: solo tre dei sei possibili spettatori apprezzeranno l'ottima acustica della sala e godranno di una buona vista della scena mentre gli altri tre saranno probabilmente meno soddisfatti. «Le attuali Prima e Seconda Galleria corrispondono al quinto ordine dei palchi, trasformato in galleria in due riprese a cavallo del 1900, ed all'antico "loggione" ideato dal Piermarini. Dall'alto delle gallerie si possono osservare le decorazioni del proscenio sormontato dal grande orologio e lo straordinario lampadario al centro della volta. L'attuale seconda galleria, come si legge nei disegni originali del Piermarini, era destinata al "loggione ossia piccionaia". Verso la platea il loggione si presentava identico ai cinque ordini di palchi sottostanti, all'interno aveva il soffitto a volta e le pareti intonacate. L'ingresso avveniva tramite due scale a chiocciola collegate al "vestibolo per la servitù".

²⁷ Le cronache riportano che il teatro triestino nell'ottocento poteva ospitare fino a 2100 spettatori, tutti in piedi!

²⁸ Gino Negri, *L'opera Italiana*, Mondadori, pagg 37-42

Nell'ottobre del 1909, il Comune di Milano provvide a riformare la struttura del loggione, ricavando un'ampia galleria, da allora detta "seconda", la cui parte centrale venne rialzata per consentire anche agli spettatori in piedi di vedere il palcoscenico»²⁹.

Qualità acustiche della Scala e del “teatro all’italiana”

Costruito nel 1778, qualche anno dopo il teatro bolognese, danneggiato gravemente dalle bombe della seconda guerra mondiale, riaperto nel 1946 e ora oggetto di un discusso intervento di restauro, particolarmente adatto all’opera non wagneriana, il teatro Alla Scala ha un’ acustica eccellente, pari, secondo Beranek, solo al Staatsoper di Vienna, edificato cent’anni più tardi (1869). Piermarini non ricostruisce il teatro bruciato all’interno del Palazzo Ducale per ragioni di scarso spazio disponibile, nate dall’impossibilità di acquistare i terreni adiacenti. Sempre per la medesima ragione e a costruzione avanzata, si deve la riduzione della lunghezza del palcoscenico che era inizialmente di sette grandi campate. In origine il palcoscenico si prolungava nella sala fin oltre il proscenio, nello spazio ora occupato dall'orchestra, ed il suo pavimento in assoni di pioppo solcato dalle guide per le scene mobili si estendeva per una lunghezza di oltre trenta metri su una larghezza di quasi ventisei. Per sostenere i lunghi ballatoi che permettevano ai macchinisti di seguire i movimenti delle scene, si costruiscono su ognuno dei due lati sei grossi pilastri.

Ciò che invece rende La Scala “unica” è l’anima, lo spirito della Storia che l’ha attraversata, la tradizione musicale, i grandi compositori che vi hanno lavorato, come Puccini, Verdi, i grandi interpreti, come Maria Callas e Enrico Caruso. La forma a ferro di cavallo (il raccordo di una semicirconferenza con due tratti rettilinei) disegnata da Giuseppe Piermarini , come si è già visto, è stata impiegata anche in molti altri teatri d’Europa, nello Staatsoper di Vienna, nel teatro Nazionale dell’Opera di Parigi (1875), nel Royal Opera House (1858) di Londra: questa pianta, solitamente, permette di avere un ITDG inferiore ai 20 millesimi di secondo a causa della piccola distanza fra il palco e la scena, ma , per l’alto soffitto, spesso solo tre riflessioni in 0,06 secondi. La Scala ha un ITDG di 0,015 secondi³⁰ e solo tre riflessioni nell’arco di 60 millesimi di secondo, valori comuni con lo Staatsoper di Vienna: in entrambi i teatri le prime due riflessioni

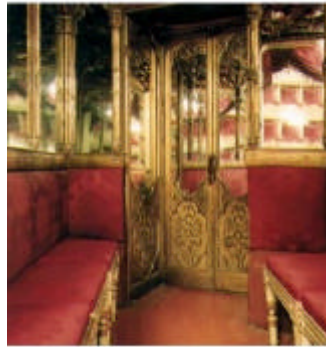
²⁹ www.teatroallascala.it

³⁰ C’è discordanza fra i valori riportati da Beranek (1962) e i dati di A. Farina (2002): quest’ultimo riporta un valore dell’ ITDG pari 21,5 ms.

(rispettivamente $0,015 + 0,012$ s e $0,015 + 0,007$ s), divise solo da pochi millesimi di secondi, rinforzano ulteriormente il suono diretto. Il Metropolitan, secondo Beranek, è un buon teatro ma inferiore al teatro scaligero, per il basso tempo di riverberazione e per un ITDG alto, sia nella prima che nella seconda riflessione, causa di scelte inappropriate riguardo le superfici riflettenti ($0,022$ s + $0,018$ s). La Scala ha un T30 uguale a 1,2 secondi e EDT più elevato (1,3 s) e, essendo riverberante, ha un C80 di -0.11 dB. I volumi e la forma del Teatro Alla Scala, esempio di sala all'italiana, ha valori molto simili a quelli della Pergola per quanto riguarda il T30, EDT e anche C80, e un ITDG superiore a causa della maggior altezza del soffitto. La diversità notevole sta nella grandezza della Scala e nelle differenti caratteristiche fonoassorbenti delle superfici.

Il teatro comunale di Firenze ha T30 pari a 1,6 secondi, un EDT di 1,2 s, e un C80 elevato pari a +4.7 dB³¹: il teatro è molto vivo ed è particolarmente adatto alla prosa dove è fondamentale la chiarezza. Diverso sarà la valutazione sulla lirica: questa si compone del parlato e della musica e perciò la sala sarà molto carente circa il secondo aspetto. All'opposto, per esempio, la Sala di Poggio Imperiale, sempre a Firenze, è molto più riverberante (EDT=2.1 secondi), ha un ITDG basso (15 ms) che rinforza il suono diretto, equilibrando l'alta riverberazione e contribuisce alla brillantezza del suono; possiede una chiarezza a 80 ms inferiore, -1.21 dB, al teatro Alla Scala. E' molto adatta alla musica sinfonica: la riverberazione mescola i suoni rendendo efficaci i *fortissimo* e, nei veloci passaggi, la sala risponde bene per le dimensioni ridotte e il basso soffitto a cui è legato il basso ITDG. Alla Scala, la sede dell'orchestra era situata allo stesso livello della platea, dalla quale era separata tramite "un'assata in pendio" che veniva rimossa in occasione delle feste da ballo. L'abbassamento del piano dell'orchestra e la realizzazione della cassa armonica di forma concava furono compiute nei primi anni del '900 su indicazione di Arturo Toscanini.

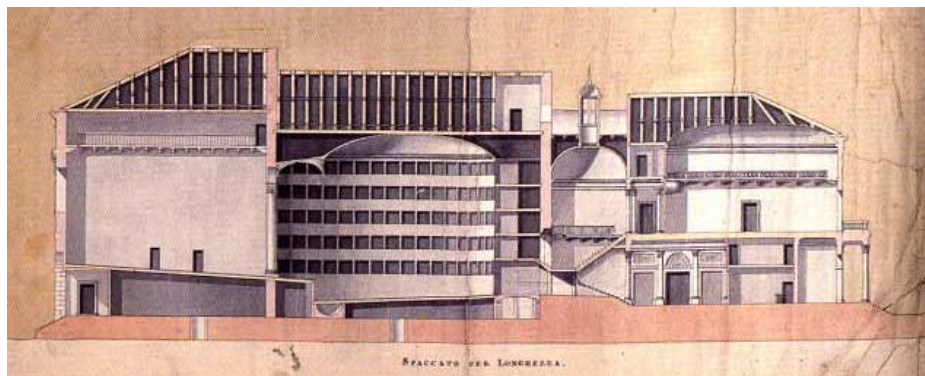
³¹ Per il parlato $C_{80} > 3$ dB e per la musica $-4\text{dB} < C_{80} < 2$ dB



Interno di un palco, Teatro alla Scala



Festspielhaus, golfo mistico



Sezione longitudinale del Teatro *La Fenice*; si notino le pendenze accentuate del palcoscenico e della platea; la torre scenica; la copertura a cupola

Nel 1976 venne infine realizzato il meccanismo idraulico che consente al piano dell'orchestra di essere sollevato al livello del palcoscenico: l'orchestra può essere pensata come un'estensione del palco, anche se ad una quota più bassa. Il suono deve uscire pulito, immesso nella sala senza distorsioni, ben bilanciato, ovvero con il giusto peso relativo di ogni sezione ; per ottenere l'assieme, cioè la capacità dei cantanti e dei musicisti di iniziare e terminare all'unisono, gli interpreti devono poter sentire la musica prodotta nella fossa in termini di vivezza, intimità e intensità.

Più controverso è il disegno della fossa degli orchestrali nella *Festspielhaus*, concettualmente diversa, perché diverse sono le richieste dell'opera wagneriana: il primo proposito è di ottenere un ottimo bilanciamento fra il suono dell'orchestra e il canto. Il secondo intento, più ideologico, è di attribuire al suono, prodotto da invisibile orchestra, una natura misteriosa e sovranaturale: a Bayreuth si incomincia a parlare di “golfo mistico”.

Il suono del teatro milanese è pulito, caldo e brillante.

Il calore, “warmth”, cioè la ricchezza dei toni a bassa frequenza , è caratterizzata da un lungo RT alle basse frequenze (125 e 250 Hz). Nell’opera , sebbene la ricchezza di bassi sia molto desiderabile, un’eventuale scarsità non è così grave se il suono dell’orchestra è subordinato alla parte vocale, il cui tempo di riverberazione deve essere basso.”

Nel teatro Alla Scala, la copertura voltata, senza irregolarità, è intonacata, come tutte le pareti dei palchi e come le quattro grandi colonne ai lati del palcoscenico; il pavimento è in legno ricoperto da tappeti, diviso dal cemento attraverso un’ intercapedine d’aria di 90 cm nella platea. A Parigi, tutte le superfici visibili sono intonacate come la copertura “a cupola” la cui forma penalizza l’ascolto di alcuni strumenti a corde nella parte finale della platea; i divisori fra i palchi sono in legno coperto con damasco, i pavimenti sono tutti in legno e tappeti , eccetto che nella galleria.

A Vienna, nella galleria le pareti assorbenti sono state rivestite di Plexiglas nel tentativo di diminuire l’intensità dei bassi e ottenere un buon equilibrio con gli strumenti a corde; i tappeti ricoprono tutto il pavimento; nel piano principale, il pavimento è composto di cemento e linoleum e in alcune sue parti ci sono passatoie di stoffa. A Londra, l’uso spregiudicato di sottili pannelli di compensato (*thin plywood*) nelle gallerie causa una seria deficienza di bassi e la superficie a cupola determina una scarsa uniformità della pressione sonora. Questo tipo di copertura, che era presente anche nel teatro La Fenice (*immagine pag. 31*), è visivamente accattivante ma non è la forma più efficace per distribuire il suono in tutto il teatro. In realtà la cupola del *Covent Garden* è ribassata e più piatta e le forti irregolarità e gli spigoli delle decorazioni producono effetti di diffrazione del suono, migliorando la diffusione. La ricerca della pienezza di tono nel suono del violino è un problema noto anche nel *Teatro Colòn*: anche in questo spazio il profilo dello soffitto, intonacato su una struttura di elementi metallici non è adatta alla riflessione delle onde in tutta la platea e nei primi due ordini di palchi. In alcuni casi un disegno “sbagliato” del soffitto può peggiorare la sala, in altri casi un soluzione azzeccata può contribuire molto favorevolmente. Un esempio è il *Met* di New York: a fronte del contributo negativo offerto dal grande volume, il doppio della Scala, il soffitto piatto con la superficie intonacata e irregolare per le decorazioni contribuisce, assieme a altri fattori, alla buona acustica della sala. Alla *Festspielhaus*, il soffitto è

composto da un centimetro di intonaco, modanature e decorazioni in legno. Analogo impiego di materiali per le superfici verticali, per le colonne e per parte dei loro capitelli.



Interno del teatro Alla Scala



Sistema di capriate simile a quello
che sostiene la volta

Strutturalmente, «la volta sulla platea, elemento chiave per l'acustica della sala, secondo il progetto del Piermarini era appesa alle grandi capriate poste a sostegno delle falde del tetto, e questi due elementi costituirono un tutto unico che rimase integro sino al bombardamento del 1943. La volta era costituita da centine in legno di pioppo appese mediante sottili tiranti in legno ai travettoni appoggiati sulle capriate. Sulle centine erano inchiodate con speciali chiodi forgiati a mano, le "bacchette", strisce larghe circa cinque centimetri ricavate da tondelli di castagno non del tutto essiccati e lasciati a macerare nell'acqua. Sulle bacchette, distanziate da alcuni millimetri, era infine steso e pressato uno spesso strato di intonaco che costituiva il soffitto della platea»³², un antico controsoffitto. Qualcosa di questo sistema viene rievocato nel Teatro degli Arcimboldi, che sostituisce il Teatro Alla Scala per qualche anno. Il soffitto non è più voltato e liscio ma discontinuo, “seghettato”: ciò che vede lo spettatore è ancora il controsoffitto, portato dal solaio attraverso un sistema di profilati di acciaio. Si compone di pannelli riflettenti rivolti verso la platea e di pannelli fonoassorbenti rivolti verso l'orchestra. A parte il lampadario centrale, le luci si diffondono nella sala da piccoli tagli, praticati nei pannelli.

Nelle moderne sale, i sottili rivestimenti di legno che nascondono le intercapedini d'aria sono i più comuni responsabili di questa carenza di bassi. Questa dogmatica asserzione è in netto contrasto con un pensiero molto diffuso in architettura secondo il

³² www.teatroallascala.it

quale il legno è buono”.³³ A parte Bayreuth, non si è scelto per gli interni il legno. Se si prendono i valori del coefficiente di assorbimento, α , a 125 Hz, di un rivestimento di legno con intercapedine d’aria ($\alpha=0,3$ circa), si vede che questo assorbe 3/10 dell’intensità dell’onda tutte le volte che da questo viene riflessa; supponendo che un’onda incida su il soffitto o sulle pareti 10 volte al secondo (vel. 340 m/s), l’intensità del suono dopo 10 riflessioni sarà 1/35 dell’intensità iniziale. Una parete intonacata (per l’intonaco liscio $\alpha=0,02$, per quello acustico *Davidson* $\alpha=0,01$) invece riduce il suono a un terzo della sua originale intensità, a parità di riflessioni. Diminuendo il coefficiente di assorbimento si riesce a aumentare T, rendendo la sala “calda con ricchezza di bassi”, ma un uso spregiudicato di materiali poco assorbenti, a parità di volume e superficie assorbente, determina un’eccessiva riverberazione e, di conseguenza, la sensazione di essere in una sala rimbombante.

In alcuni casi, quando solitamente l’ambiente d’ascolto non è ampio, senza intervenire sul rivestimento delle superfici, si può aumentare l’assorbimento alle basse frequenze e la diffusione alle frequenze alte, con *bass trap* che contengono una membrana riflettente per le frequenze superiori a 500 Hz e un volume d’aria interno che risulta assorbente per le frequenze basse.

³³ Leo Beranek, *op. cit.*, pag. 436,437

Bibliografia

L. L. Beranek, *Music, Acoustics & Architecture* (1962)
Renato Spagnolo, *Manuale di Acustica, Utet*
ISO 3382
Enciclopedia dell'Arte, voce *Acustica*
Renzo Piano, *Giornale di bordo*, Passigli editore
Gino Negri, *L'opera Italiana*, Mondadori
Giorgio Lotti, *Teatro Alla Scala*, Mondadori
Teatro degli Arcimboldi, Casabella 699, Elemond Editore
International art village, Casabella 669, Elemond Editore

Siti internet consultati

<http://www.nagata.co.jp>
<http://pcangelo.eng.unipr.it/Public/Papers/156-AppliedAcoustics2001.pdf>
<http://pcangelo.eng.unipr.it/dispense00/beretti125401/beretti125401.doc>
<http://pcangelo.eng.unipr.it/dispense99/ricci114990.doc>
<http://pcangelo.eng.unipr.it/Public/Papers/168-IOA2002.pdf>
http://web.iuav.it/iuav/Didattica/Pagine-dei/Antonio-Ca/acustica/TRAME_PR.pdf
<http://www.concerthalls.unomaha.edu/>
www.kemt.fei.tuke.sk/Predmety/KEMT320_EA/_web/Online_Course_on_Acoustics/gynmasium_hall.html
<http://www.teatroverdi-trieste.com>
<http://www.teatropergolesi.org/storia.htm>
<http://www.teatromassimo.it>
<http://www.teatroallascala.it>
<http://www.teatrodelgilgio.it/>
<http://www.cisapalladio.org/>
<http://www.akustiks.net/Project.html>
http://www.aac.pref.aichi.jp/english/gekijyo/guide/c_holeg.htm
http://www.safa.fi/ark/ark_96/acoustics.html
<http://www.angelfire.com/music2/davidbundler/acoustics.html>