

John R. PIERCE
LA SCIENZA DEL SUONO
Zanichelli Editore Bologna

Fra il 1895 e il 1915 Wallace Clement Sabine, Hollis Professore di Matematica e Filosofia all'Università di Harvard, gettò le fondamenta di una nuova scienza, l'acustica architettonica. Prima di Sabine, nella progettazione architettonica ci si limitava ad imitare le sale in cui l'acustica era buona. Inoltre erano in vigore una serie di pratiche superstiziose, come quella di tendere degli inutili fili nelle parti alte di chiese o sale da concerto.

L'acustica architettonica nacque perché un uomo notevole si trovò di fronte ad una situazione che richiedeva una soluzione: il problema consisteva nel fatto che era quasi impossibile capire i conferenzieri nella sala del Fogg Art Museum, che era stato appena aperto. Nel 1895, l'Università di Harvard chiese a Sabine di trovare un rimedio.

Sabine avvicinò i problemi dell'acustica architettonica munito di una mente acuta e indagatrice, un buon orecchio, un cronometro, un organo a canne con un serbatoio di aria compressa come fonte sonora. Egli identificò il motivo per il quale i discorsi nella sala del Fogg Art Museum erano inintelligibili: il suono persisteva troppo a lungo (cioè la riverberazione era eccessiva). Sabine ridusse la riverberazione ricoprendo di feltro alcuni muri. Dopo di che, egli scrisse, la sala divenne "non eccellente, ma del tutto atta allo scopo".

Sabine fu il primo a definire il tempo di riverberazione, un parametro molto importante nello studio dell'acustica delle sale da concerto. Secondo la definizione di Sabine, questo era il tempo impiegato da un suono riverberante per divenire appena udibile. Molti anni dopo, quando divenne possibile eseguire misurazioni elettroniche del livello di intensità sonora, il tempo di riverberazione venne definito come il tempo impiegato da un suono, dopo il suo spegnimento, per decrescere di 60 dB di livello di intensità; questa è la definizione accettata oggi. Musiche e teatri diversi richiedono tempi differenti di riverberazione. ...

Uno dei problemi maggiori dell'acustica architettonica è sempre stato quello di ottenere dei calcoli accurati dei tempi di riverberazione. Sabine non solo definì il tempo di riverberazione, ma inventò anche un modo utile, anche se non del tutto preciso, per calcolarlo in funzione del volume e della frazione del suono incidente riflesso dai muri e dalle altre superfici.

Il lavoro di Sabine era arduo. Lavorando in una camera sotterranea con muri di cemento e mattoni egli riuscì a misurare i coefficienti di assorbimento di molti materiali diversi. In altri luoghi, Sabine passava intere notti aspettando dei momenti sufficientemente silenziosi per poter eseguire le sue misurazioni. Egli studiò anche la trasmissione del suono e il modo per isolare le stanze acusticamente, una necessità molto sentita nei conservatori.

Sabine si dedicò soprattutto a migliorare l'acustica delle sale progettate da architetti che erano totalmente all'oscuro delle necessità degli ascoltatori o che semplicemente non se ne curavano: un vizio ancora molto comune fra gli architetti. Ma Sabine progettò anche una sala, la Symphony Hall di Boston, costruita nel 1900. Ancor oggi la Symphony Hall è una delle migliori sale da concerto del mondo.

La ricerca sull'acustica architettonica non viene più condotta negli Stati Uniti, il paese dove è nata, ma in altri paesi, come la Germania Ovest, dove si stanno raggiungendo dei risultati eccellenti. Vi sono due problemi generali nell'acustica architettonica e ciascuno di questi ha molti aspetti secondari. Un primo problema è: che cosa vogliamo ottenere? Che cosa permette agli esecutori di suonare bene? E che cosa rende il suono più bello? Il secondo problema è: come possiamo ottenere le qualità desiderate dagli esecutori e dal pubblico?

Naturalmente è importante tener conto del rumore, ... La progettazione di sale da concerto richiede che venga prestata molta attenzione sia a eliminare il rumore esterno sia a evitare di produrre rumore interno. I sistemi di condizionamento dell'aria, per esempio, spesso fastidiosi per chi lavora in ufficio, a volte lo sono anche in una

sala da concerto.

... gli esecutori sentono la necessità di ascoltare i suoni riflessi; per sviluppare questo concetto, sono state esaminate sia le preferenze di vari esecutori per sale differenti, sia le loro prestazioni in determinate condizioni ricreate in laboratorio. I solisti rimangono soddisfatti se il suono riverbera, non importa come; quando invece si tratta di suonare in gruppo, sono le riflessioni ravvicinate del suono che contano; diciamo le riflessioni dal soffitto e dal fondale dietro gli esecutori. Infatti, ciascun musicista vuole sentire tutte le altre parti per mezzo di riflessioni che non siano troppo ritardate. Una buona trasmissione del suono dall'orchestra al pubblico non è molto utile se gli esecutori non riescono a suonare bene assieme. E' ben noto che gli esecutori, e anche il pubblico, preferiscono sentire la musica riflessa da un pavimento di legno, piuttosto che da un pavimento di cemento.

Il problema delle esecuzioni all'aperto, come quelle che hanno luogo alla Hollywood Bowl, è vecchio quanto il teatro greco: queste esecuzioni sono infestate da rumori di ogni specie. Anche se è facile sistemare delle superfici riflettenti vicine all'orchestra per permettere agli orchestrali di sentirsi l'un l'altro, è del tutto impossibile far arrivare al pubblico del suono per riverberazione, almeno non senza un sistema di amplificazione artificiale. Senza l'ausilio dell'elettronica la musica all'aperto non può suonare bene come in una sala da concerto. Potrà anche essere divertente, ma non dal punto di vista della buona acustica.

In questo capitolo esamineremo in un certo dettaglio sia gli aspetti fisici della trasmissione e del decadimento del suono nelle sale da concerto, sia gli aspetti psicologici: che cosa fa sì che una sala da concerto sia una buona sala da concerto? Sabine si dedicò a entrambi gli aspetti; egli condusse degli esperimenti per trovare il tempo di riverberazione preferito nelle sale da concerto, e sapeva che il tempo di riverberazione ottimale per le sale destinate alla musica è più lungo di quello per le sale da conferenze. Capi anche che gli echi dovevano essere evitati e sapeva cosa fare per eliminarli.

Dai tempi di Sabine sono stati fatti molti progressi. Abbiamo guadagnato nuove conoscenze sulla psicoacustica (per esempio, l'effetto Haas) e anche i mezzi elettronici per la produzione e la misurazione del suono sono stati molto utili: i computer ci hanno aiutato molto. Ma queste risorse non sarebbero servite a nulla senza il lavoro di pochi ma valenti uomini che attraverso gli anni hanno fatto avanzare l'acustica architettonica.

Quanto siamo progrediti in questo campo? Da un punto di vista pratico, non tanto quanto avremmo voluto. La Philharmonic Hall del Lincoln Center a Manhattan aprì il 12 settembre del 1962 e fu un disastro. Ma, nel luglio del 1962, Leo L. Beranek, dello studio di architettura Bolt, Beranek & Newman, poteva scrivere nella prefazione del suo libro *Music, Acoustics, and Architectural Design*: "Il punto di maggior interesse di questo volume è la descrizione degli sforzi fatti nel progettare la Philharmonic Hall del Lincoln Center. La dea Fortuna è stata finalmente spodestata dall'analisi più accurata e dalla stupefacente applicazione di nuovi ma sicuri principi acustici».

Che cosa andò male nel progetto della Philharmonic Hall, e perché?

Il perché sta nel fatto che fu dedicata molta attenzione ad aspetti che Beranek riteneva importanti e poca ad altre questioni che poi si rivelarono ancora più importanti.

Per quanto riguarda la prima parte della domanda, la risposta è: praticamente tutto. (I dettagli si trovano negli articoli di Manfred Schroeder e dei suoi colleghi). Vi erano degli echi in alcuni posti, gli orchestrali non riuscivano a sentirsi l'un l'altro (dato che il muro alle loro spalle assorbiva troppo), non c'era una riverberazione sufficiente, la diffusione del suono nella sala era inadeguata. Ma la cosa peggiore è che vi era un'apparente assenza delle frequenze basse: era difficile sentire i violoncelli e i contrabbassi.

Ciò non appariva dalle misure dell'energia totale del suono che raggiungeva l'ascoltatore nel secondo successivo all'arrivo del suono diretto. ... Benché l'energia decresca un poco nell'ottava dai 125 al 250 Hz, si tratta di una caduta di soli 5 dB.

Lo sbaglio consisteva in un'iniziale mancanza di suoni a bassa frequenza, sia nei suoni provenienti direttamente dal palcoscenico, sia nei suoni riflessi dal soffitto costituito da un gran numero di pannelli.

La Figura ... mostra questa deficienza nel caso dei suoni diretti dal palcoscenico. L'energia relativa del suono

diretto espressa in decibel è data in funzione della frequenza per distanze uguali a 7, 13 e 31 metri dal palcoscenico. Si registra un minimo pronunciato fra i 100 e 1200 Hz; inoltre questo minimo si abbassa mano mano che ci allontaniamo dal palcoscenico. Il pavimento della sala non era molto ripido, cioè non andava molto in discesa verso il palcoscenico. Il suono passava sopra le teste del pubblico; dato che gli spazi fra le file tendevano a comportarsi come risonatori, a basse frequenze le onde sonore venivano piegate verso l'alto, lontano dal pubblico. Il modo in cui le onde venivano riflesse dalle file successive degli schienali delle poltroncine (diffrazione) rendeva la perdita delle basse frequenze ancora più pronunciata.

Che cosa avveniva del suono riflesso dal soffitto? La Figura ... mostra l'energia media riflessa dai pannelli durante un intervallo di tempo breve centrato sull'istante d'arrivo del suono riflesso dal soffitto. Considerando l'ottava che va dal 125 ai 250 Hz, l'energia media cade di circa 11 dB al di sotto del suo valore per l'ottava dal 500 ai 1000 Hz.

Come mai i pannelli riflettevano così poca energia dei suoni a bassa frequenza? Il motivo è che i pannelli non erano abbastanza grandi; una superficie piatta è in grado di agire come un riflettore solo se è sufficientemente ampia rispetto alla lunghezza delle onde sonore. I pannelli non erano abbastanza grandi per essere in grado di riflettere suoni a frequenze inferiori ai 300 Hz.

La curva di Figura ... mostra quanto poco suono a bassa frequenza raggiungesse la platea, mentre la Figura ... mostra quanto poco ne venisse riflesso dai pannelli del soffitto. Ma allora perché la Figura ... ci dice che una considerevole quantità di energia dei suoni a bassa frequenza raggiungeva infine l'ascoltatore? La risposta è che lo spettatore veniva raggiunto dalle frequenze basse solo dopo molte riflessioni ripetute, dopo che avevano attraversato la sala più volte. Questi suoni arrivavano così in ritardo, che l'ascoltatore non riusciva ad associarli con le note che i violoncelli e i contrabbassi suonavano. In definitiva, divenivano rumori di sottofondo, separati dalla loro fonte musicale.

Vari sforzi vennero intrapresi per ristrutturare la Philharmonic Hall. Il palcoscenico subì modificazioni in modo tale che gli orchestrali riuscissero a sentirsi l'un l'altro. Vennero riallineati i pannelli per formare sostanzialmente un soffitto piatto. Elementi irregolari furono disposti sui muri per aumentare la diffusione sonora. Le poltroncine vennero sostituite con delle altre dotate di minor capacità di assorbimento. La parte anteriore della balconata fu inclinata leggermente e del materiale assorbente venne installato sul muro in fondo alla sala per diminuire gli effetti d'eco. Tutto ciò rese la sala in qualche misura migliore.

Infine, la Philharmonic Hall venne completamente ridisegnata da uno dei più grandi esperti di acustica architettonica, Cyril Harris della Columbia University, e divenne la Avery Fisher Hall.

La storia di Wallace Sabine è la storia del trionfo di una nuova disciplina scientifica. La storia della Philharmonic Hall è invece quella di un disastro costosissimo dovuto all'incompetenza. Ma c'è un lato più fortunato nell'acustica architettonica, ben illustrato dal lavoro di Manfred Schroeder, i cui contributi ci dicono bene che cosa questa disciplina è in grado di ottenere.

Un problema costante nella progettazione di sale da concerto è stato quello di derivare delle predizioni accurate sui tempi di riverberazione. Sabine inventò una formula molto semplice per calcolare il tempo di riverberazione T espresso in secondi: $T = 13.8 L / va$.

Qui L è il libero cammino medio fra due successive riflessioni delle onde sonore, v è la velocità del suono e a è il coefficiente di assorbimento, che vale 0 per la riflessione perfetta e 1 per l'assorbimento totale.

Sabine assumeva che il libero cammino medio L fosse proporzionale alla radice cubica del volume. Comunque era già noto dalla teoria cinetica dei gas che il libero cammino medio è dato da $L = 4V / S$, dove V è il volume e S la superficie interna del volume considerato.

Un problema è che la formula di Sabine prevede un tempo di riverberazione finito nel caso dell'assorbimento totale ($a=1$). Nel 1929, K. Schuster ed E. Waetzmann, e successivamente Carl F. Eyring nel 1930, rimediarono a questo inconveniente proponendo una formula leggermente diversa: $T = -13.8(L / v) / \ln(1-a)$.

Le formule di Sabine ed Eyring vennero accettate per più di mezzo secolo. Ma, negli anni Sessanta, delle misurazioni condotte con apparecchiature elettroniche in varie sale, moderne e antiche, mostrarono alcune

limitazioni di queste formule.

Che fare? Un sistema consiste nel seguire, con un computer digitale, le riflessioni successive di raggi rappresentanti i vari cammini delle onde sonore. Alcuni raggi incontreranno materiale assorbente e perderanno energia dopo la riflessione; altri saranno riflessi da pareti di legno o intonacate e perderanno meno energia. Nel 1970 Schroeder pubblicò un articolo nel quale, utilizzando questo sistema di simulazione al computer, dava alcuni esempi sui tempi di riverberazione relativi ad ambienti chiusi bidimensionali di forma irregolare aventi alcuni muri rivestiti di materiale assorbente. Schroeder confrontò la curva rappresentante il livello di intensità sonora espresso in dB in funzione del tempo (il che fornisce il tempo di riverberazione) con le curve ottenute con le formule di Sabine ed Eyring. ... per il poligono trapezoidale illustrato nella figura, che è dotato di materiale assorbente su una parete, la simulazione al computer dà un tempo di riverberazione che è 0.6 volte quello predetto dalla formula di Sabine e 0.7 volte quello predetto da Eyring.

Questi risultati sono importanti non solo per la progettazione delle sale da concerto, ma anche per la determinazione dei coefficienti di assorbimento di vari materiali, ...

La velocità alla quale l'intensità del suono diminuisce dipende sia dalla forma e dalle dimensioni dell'ambiente, sia dalla quantità e dalla posizione del materiale assorbente. Nella Figura ... si vede un confronto fra i coefficienti di assorbimento calcolati con una simulazione al computer e i coefficienti calcolati secondo le formule di Sabine ed Eyring. Se accettiamo i risultati ottenuti al computer, dobbiamo concludere che le formule di Sabine ed Eyring portano a stime eccessive dei coefficienti di assorbimento. Tali stime possono addirittura dare un assorbimento sonoro due volte maggiore.

Recentemente sono stati fatti ulteriori progressi nella teoria del tempo di riverberazione. Per molti anni si sapeva che il "corretto" approccio era dato da un'equazione integrale molto complicata; tale equazione è essenzialmente irresolubile, anche al computer. E. N. Gilbert ha recentemente mostrato che utilizzando un'altra equazione integrale era in grado di ottenere risultati validi con un metodo iterativo. Gilbert ha così ottenuto dei risultati "corretti" per varie forme chiuse. I calcoli e le misure di quantità fisiche quali il tempo di riverberazione sono molto interessanti, ma quello che vogliamo in definitiva sapere è: quanto bene suona un'orchestra in una certa sala? Formulare un giudizio è difficile, perché orchestre differenti suonano in sale differenti in tempi differenti e anche la sensibilità dell'ascoltatore itinerante può differire da un'occasione all'altra. E' possibile trovare un modo di portare diverse sale, tutte insieme nello stesso momento, allo stesso ascoltatore? La risposta è sì.

Nel 1967, Manfred Schroeder e Bishnu Atal mostrarono come due altoparlanti possano produrre una fonte sonora apparente collocata esternamente ai due altoparlanti. Nel 1969, P. Damaske e V. Mellert usarono questo effetto per produrre un sistema stereo "perfetto". I suoni venivano raccolti da due condotti auditivi di una testa finta munita di due padiglioni auricolari. ... I segnali venivano poi filtrati, elaborati e inviati a due altoparlanti situati in una camera anecoica; ... I suoni emessi dai due altoparlanti potevano ricreare nei condotti auditivi della testa finta esattamente le stesse sollecitazioni di pressione sonora che erano state prese quando la testa era esposta alla registrazione dal vivo.

A che cosa serviva tutto ciò? Supponete di aver eseguito una registrazione su due canali dei suoni presenti nei condotti auditivi della testa finta "seduta" in una sala da concerto. Con questa registrazione si può ricreare per un ascoltatore in una camera anecoica esattamente quello che la testa finta ha sentito nella sala. Passando da una registrazione eseguita in una sala a quella eseguita in un'altra sala, è possibile fare dei confronti sulla qualità del suono.

Schroeder e i suoi due collaboratori, D. Gottlob e K. F. Siebrasse, confrontarono più di venti sale da concerto europee. Essi riuscirono a ottenere una registrazione della sinfonia Jupiter di Mozart eseguita dall'orchestra della BBC in una camera anecoica. Schroeder, Gottlob e Siebrasse suonarono questa registrazione utilizzando vari altoparlanti piazzati sui palcoscenici delle diverse sale prese in considerazione. In ciascuna sala registrarono quello che la testa finta sentiva quando era seduta in diverse posizioni e con queste registrazioni poterono poi ricreare in una camera anecoica esattamente quello che la testa finta aveva sentito nelle varie

sale. Schroeder scrive:

«Non dimenticherò mai il momento in cui, seduto comodamente nello "spazio libero" di Goettingen, mi spostai per la prima volta dalla famosa Musikvereinsaal di Vienna alla Philharmonie di Berlino. E' difficile trovare le parole per descrivere quanto le differenze acustiche di queste due sale, la cui esistenza era ben nota, fossero vividamente evidenziate dal confronto diretto.»

Analizzando i giudizi espressi da molti soggetti su diverse registrazioni eseguite in varie posizioni e varie sale, Schroeder e i suoi collaboratori riuscirono a capire quali erano le preferenze degli ascoltatori: erano preferiti lunghi tempi di riverberazione (circa 2.2 secondi).

I suoni percepiti dall'orecchio sinistro dovevano differire da quelli percepiti dall'orecchio destro. Più erano simili e meno erano graditi.

Le sale strette erano preferite a quelle larghe. Forse questo dipende ancora dal fatto che gli ascoltatori preferiscono una diversità di suono dai due orecchi. Infatti in una sala larga il primo suono riflesso proviene dal soffitto, mentre in una sala stretta le prime riflessioni provengono dai muri di sinistra e di destra, e queste riflessioni sono differenti.

Come deve essere dunque una buona sala da concerto? Deve avere un tempo di riverberazione sufficientemente lungo e inoltre deve amalgamare il suono in modo tale che i suoni che arrivano all'orecchio sinistro siano diversi da quelli che raggiungono l'orecchio destro. L'amalgama dei suoni deve essere tale anche da rendere tutte le posizioni nella sala ugualmente buone e cioè deve favorire la diffusione del suono in tutta la sala.

Molta ricerca matematica è stata recentemente dedicata alla progettazione di muri e soffitti con sporgenze e rientranze che sparpagliano il suono incidente piuttosto che rifletterlo a specchio. ... un esempio di soffitto in cui le profondità dei "pozzi", lunghi e stretti, sono derivate in base ai residui quadratici studiati nella teoria dei numeri. Non siate dunque sorpresi se i soffitti e i muri di alcune sale da concerto moderne sono ruvidi e pieni di irregolarità.

Non sorprendetevi nemmeno dell'esistenza di sale "accordabili", in cui il tempo di riverberazione può essere modificato cambiando i pannelli assorbenti oppure tramite sistemi elettronici. La nuova Louise M. Davis Hall della San Francisco Symphony è accordabile meccanicamente, così come l'Espace de Projection all'IRCAM di Parigi.

In quali condizioni la musica suona bene? La risposta è ovviamente: in una buona sala. E quali sono le caratteristiche di una buona sala? Una buona sala deve essere silenziosa e deve essere ragionevolmente buona per tutti i posti; suoni di tutte le frequenze devono essere udibili dagli ascoltatori; la riverberazione deve essere sufficiente: alcune composizioni ne richiedono più di altre. I teatri di prosa devono essere meno riverberanti. Nel caso della musica, il suono che raggiunge l'orecchio sinistro deve essere diverso dal suono che raggiunge l'orecchio destro. Ma forse una buona sala deve avere molte altre caratteristiche. Gli studiosi di acustica architettonica continuano a fare nuove scoperte.