Marco Marinoni

ACUSTICA E PSICOACUSTICA MUSICALE

Lezione 10 - Modalità di esecuzione delle misure

10.1
10.2
10.3
10.4
10.5
10.6
10.7
10.8
10.9

Indice

1. I requisiti acustici delle sale d'ascolto
2. Posizioni di misura
3. Strumentazione
4. Misura e rappresentazione dei parametri acustici
    1. Parametri acustici energetici
    2. Initial Time Delay Gap
    3. Indici di intelligibilità
    4. Parametri acustici per la spazializzazione
5. Tecniche di misura a confronto
6. La coda sonora
7. Parametri oggettivi e soggettivi nella valutazione del campo sonoro
8. Teoria di Ando
9. Criteri progettuali

1 – I requisiti acustici delle sale d'ascolto

- Il campo acustico in un ambiente fisicamente confinato differisce da quello di uno spazio aperto per la presenza, accanto alle onde sonore dirette sorgente-ascoltatore, di **onde sonore riflesse in vario modo dalle superfici delimitanti l'ambiente ed interne ad esso**.
- La qualità acustica di una sala é determinata dalle caratteristiche e dalle modalità di sovrapposizione dei due campi sonori: quello **diretto** e quello **riverberato** (o **diffuso**).
  - In genere i due campi sono compresenti e si parla di campo **semiriverberante**.

1 – I requisiti acustici delle sale d'ascolto

- All'interno dell'energia sonora riflessa è poi importante distinguere:
  - le **prime riflessioni**
    - intensità paragonabile a quella del suono diretto, e vanno trattate con particolare attenzione
  - **riflessioni successive**
    - percepite come un progressivo attenuarsi del segnale.
- Entrambe vanno a costituire la '**coda sonora**', ovvero il prolungamento del segnale sonoro nell'ambiente.

1 – I requisiti acustici delle sale d'ascolto

- La **combinazione ottimale dei due campi sonori** ed il **ruolo delle prime riflessioni** variano con il tipo di segnale da trasmettere nella sala: parlato o musica.
  - Nelle sale per concerti é desiderabile un prolungamento di ogni singolo impulso sonoro, fonema o nota musicale, maggiore che nelle sale per conferenze o i teatri di prosa.
    - L'entità di tale prolungamento, o coda sonora, varia anche con i generi musicali.

1 – I requisiti acustici delle sale d'ascolto

- Importanti sono i **ritardi** delle prime riflessioni (non inferiori al suono diretto per più di 10 dB) e la loro **direzione di arrivo**.
  - A seconda del loro ritardo rispetto al suono diretto, queste riflessioni possono rafforzarlo (grazie al meccanismo integratore del nostro sistema uditivo) oppure essere percepite come eco.
  - La loro direzione invece influisce sulla localizzazione della sorgente (parlato) e sul senso di immersione nello spazio sonoro (musica sinfonica).

1 – I requisiti acustici delle sale d'ascolto

- In funzione del tipo di messaggio sonoro vanno dunque definite le caratteristiche del **campo sonoro diretto**, delle **prime riflessioni** e della **coda sonora**, e studiate di conseguenza:
  - la geometria della sala, ovvero delle superfici di confine e non in essa presenti,
  - le caratteristiche acustiche delle superfici stesse

1 – I requisiti acustici delle sale d'ascolto

- **Il campo acustico diretto**
  - Studiato per valutare la **distanza massima sorgente - ascoltatore che consenta una corretta percezione del segnale sonoro** in assenza di dispositivi di elettroamplificazione.
    - In conseguenza di tali valutazioni si può studiare la possibilità di inserire gallerie e balconate o di inclinare opportunamente la platea.

1 – I requisiti acustici delle sale d'ascolto

- **Il campo acustico diretto**
  - Il livello di pressione sonora del campo diretto che raggiunge l'ascoltatore (SPL) dipende da vari fattori:
    - **potenza della sorgente**: per una voce umana forte si può assumere un livello di potenza sonora (Lw) di 75 dB per la voce maschile, 73 per la voce femminile, un "fortissimo" orchestrale si può corrispondere ad un Lw di 100 dB
    - **direttività della sorgente**: né la voce umana né gli strumenti musicali sono omnidirezionali
    - **rumore di fondo**: va massimizzata la differenza fra il livello del segnale ed il livello di tale rumore (**rapporto S/R**), il quale difficilmente sarà contenibile sotto i 30-35 dB

1 – I requisiti acustici delle sale d'ascolto

- **Il campo acustico diretto**
  - Il livello di pressione sonora del campo diretto che raggiunge l'ascoltatore (SPL) dipende da vari fattori:
    - **distanza sorgente-ricevitore:** per una sorgente puntiforme l'attenuazione da divergenza sferica dell'onda sonora é di 6 dB per ogni raddoppio della distanza
    - **assorbimento acustico lungo la linea di propagazione**: l'assorbimento da parte del pubblico e delle poltrone per un'onda sonora radente é elevato, soprattutto alle basse frequenze, ma diminuisce con l'inclinazione del piano di appoggio delle poltrone.
      - Tale accorgimento favorisce anche la visibilità del palcoscenico

1 – I requisiti acustici delle sale d’ascolto

- Tenendo conto di tutti questi fattori, normalmente la distanza massima accettabile tra sorgente e ricevitore si aggira sui **25-30 metri per l’ascolto della voce umana non amplificata** e sui **45-50 metri per l’ascolto di musica**.

1 – I requisiti acustici delle sale d'ascolto

- **Le prime riflessioni**
  - possono essere utili oppure dannose a seconda che servano o meno a rafforzare il livello del suono diretto.
  - Affinché si verifichi la prima situazione il tempo di ritardo dell'onda riflessa rispetto a quella diretta e la differenza tra i rispettivi livelli non devono superare certi limiti; in caso contrario onda diretta ed onda riflessa vengono percepite separatamente come due suoni distinti (**eco**)

1 – I requisiti acustici delle sale d'ascolto

- **Eco:** avviene quando il tempo di ritardo supera i 50 millisecondi (ms) nel caso del parlato, ed i 75 ms nel caso della musica.
  - Assumendo una velocità del suono di circa 340 m/s, tali tempi di ritardo corrispondono a differenze di percorso tra le due onde rispettivamente di 17 e 25 metri.
  - Per ritardi che superano di poco i valori anzidetti é più esatto parlare di **eco ravvicinato**, mentre l'eco vero e proprio si verifica per ritardi superiori al decimo di secondo

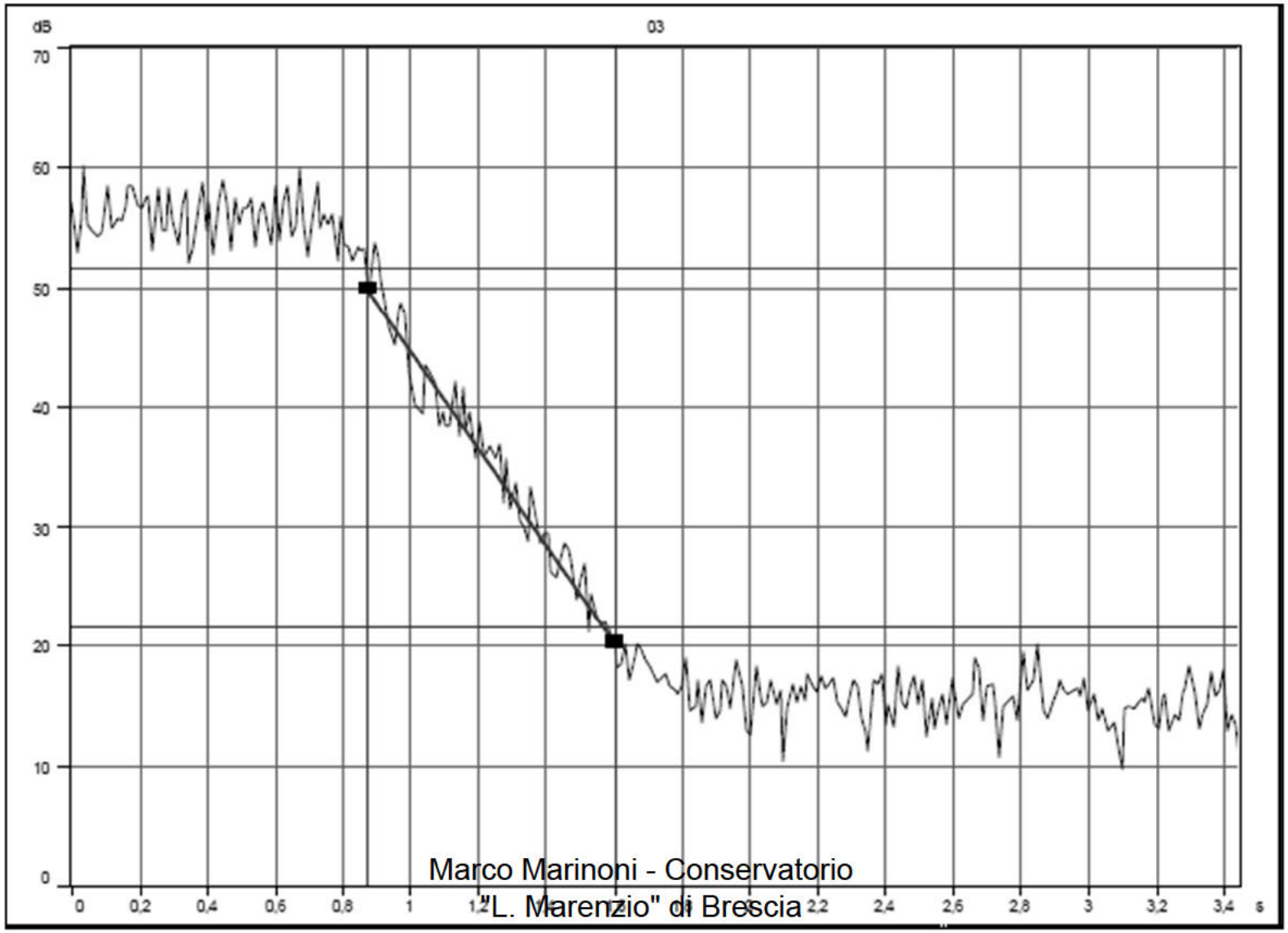
1 – I requisiti acustici delle sale d'ascolto

- **Tempo di integrazione del sistema uditivo umano = 35 ms**
- Due segnali sonori che non distano temporalmente tra loro di più di tale periodo vengono percepiti come un unico segnale (**effetto di Haas**)
  - un ritardo leggermente maggiore, di entità variabile in funzione del tipo di messaggio sonoro, può essere tollerabile o anche gradevole.

1 – I requisiti acustici delle sale d'ascolto

- Pertanto il tempo iniziale di ritardo, *Initial Time Delay Gap* (**ITDG**), che rappresenta il tempo di ritardo della prima riflessione, é uno degli indici di valutazione oggettivi della qualità acustica di una sala.
- Altri indici sono il **C80** ed il **C50**, relativi rispettivamente alla valutazione della qualità delle sale per l'ascolto della musica e del parlato

- **Esempio di coda sonora**
  - Teatro Malibran (Venezia), curva di decadimento a 500 Hz, misurata in platea (terza fila di lato).



2 – Posizioni di misura

- Il **tempo di riverberazione** e la **risposta all'impulso** rappresentano i parametri fondamentali in grado di descrivere la qualità acustica di un teatro o di una sala da concerto
- Le misurazioni vengono normalmente effettuate utilizzando **una sorgente sonora e un insieme di microfoni**, all'interno della sala

2 – Posizioni di misura

- La scelta delle posizioni in cui collocare sia **i ricevitori** sia **la sorgente** rappresenta un elemento essenziale durante una campagna di misure sperimentali
- La norma **ISO 3328** suggerisce alcuni elementi per una corretta misurazione dei parametri acustici

2 – Posizioni di misura

- **ISO 3328**
  - I microfoni devono essere collocati a una distanza non inferiore a ¼ della lunghezza d'onda da qualunque superficie, compreso il pavimento
    - Microfoni omnidirezionali a una distanza non inferiore a un metro da qualunque superficie
  - I microfoni devono distare almeno due metri l'uno dall'altro

2 – Posizioni di misura

- **ISO 3328**

I microfoni devono essere collocati a una certa distanza dalla sorgente in modo da evitare una eccessiva influenza del suono diretto. Tale distanza minima è pari a

$$d = \sqrt{\frac{2V}{cT}} \quad \text{m}$$

dove **V** è il volume dell'ambiente, **c** è la velocità del suono e **T** è il tempo di riverberazione approssimativo

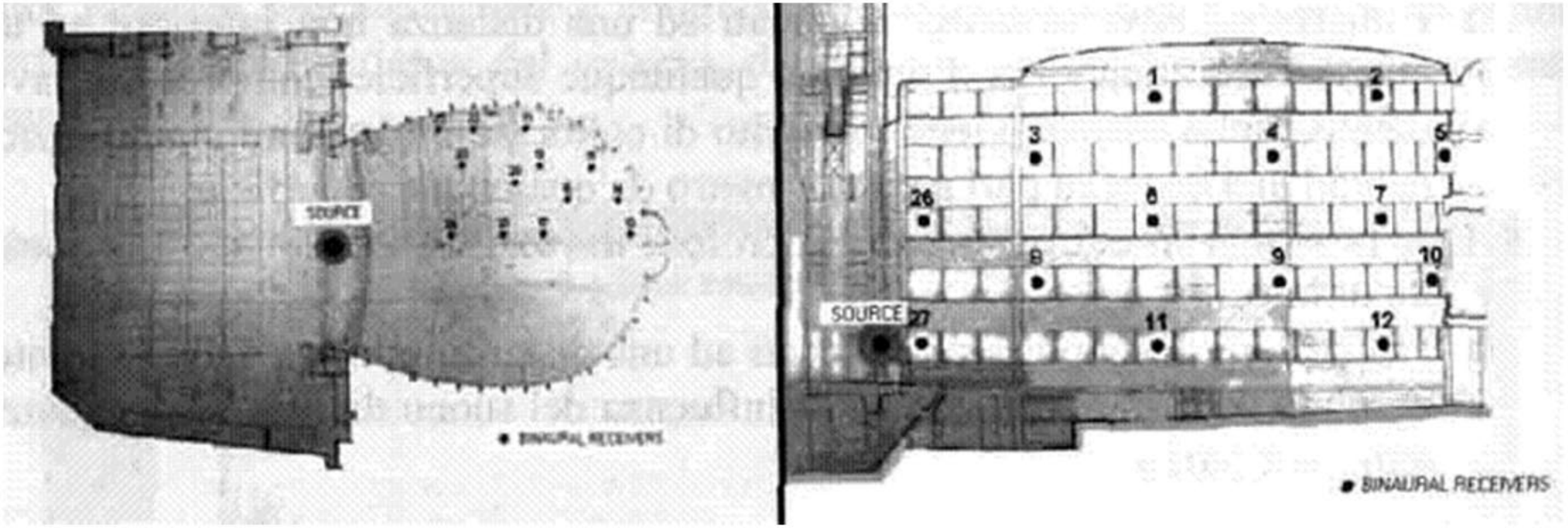
2 – Posizioni di misura

- **ISO 3328**
  - specifica che “è necessario includere un adeguato numero di posizioni di sorgente e ricevitore per caratterizzare l’intera sala
  - Stabilisce un numero minimo di posizioni dei ricevitori (ma non delle sorgenti)

Numero di posti nella sala	Numero minimo di punti di rilievo
500	6
1000	8
2000	10

2 – Posizioni di misura

- In realtà per effettuare una adeguata campagna di misura i punti di rilievo devono essere più numerosi
- Es. **Teatro La Fenice di Venezia** – novembre 1995 → 27 punti di rilievo



2 – Posizioni di misura

- Anche la **sorgente** può essere collocata in diverse posizioni
- Almeno **due punti sul palcoscenico**, corrispondenti a due diverse zone in cui possono venirsi a trovare gli esecutori
  - Nel caso dei teatri d'opera anche la **fossa d'orchestra** va considerata

3 – Strumentazione

- Varie tipologie di microfoni e di sorgenti sonore
  - **In passato:** colpo di pistola e fonometro per misurare la risposta monoaurale di un teatro
  - **Oggi:** strumentazione più evoluta, in grado di avere una risposta in frequenza piatta, senza distorsioni e con caratteristiche di direzionalità ben precise

3 – Strumentazione – sorgente sonora

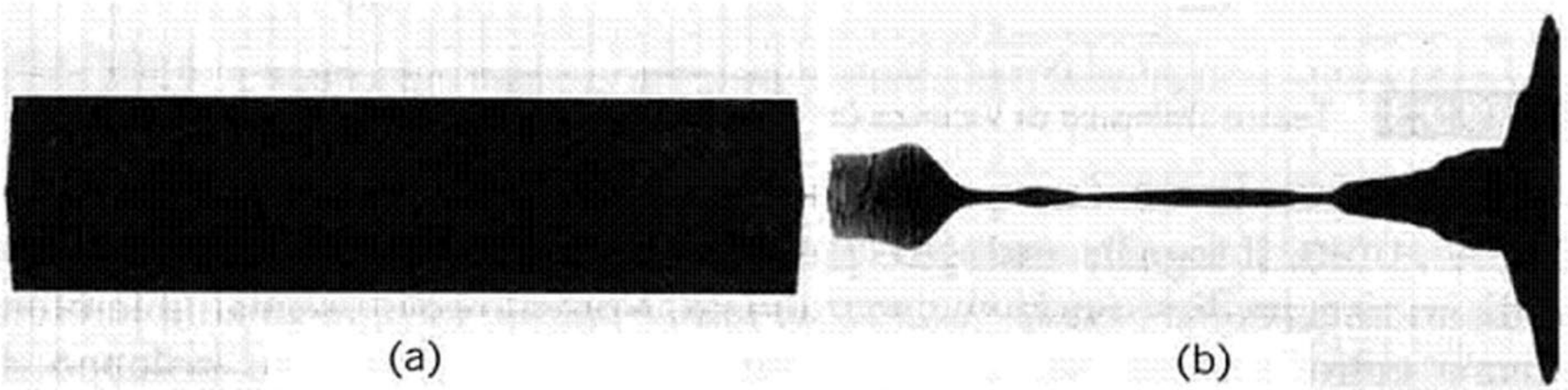
- **Sorgente sonora**
  - Rappresenta la causa maggiore di non linearità del sistema elettronico di misura
  - La norma prevede che sia **omnidirezionale** e fissa alcuni limiti di deviazione massima
  - Misurazione in **campo libero** utilizzando **rumore rosa**
    - La risposta in frequenza deve essere “adeguata” ed emettere un “segnale sufficiente” nel campo di frequenza tra 125 Hz e 4 kHz

Frequenza (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k
Deviazione massima (dB)	±1	±1	±1	±3	±5	±6

3 – Strumentazione – sorgente sonora

- Molti altoparlanti omnidirezionali (*dodecaedri*) non presentano né le caratteristiche di omnidirezionalità né un'adeguata risposta in frequenza lineare
- Si opera un **filtraggio preliminare al segnale di prova** (es. uno sweep esponenziale), dopo aver misurato in camera anecoica la risposta all'impulso dell'altoparlante → **convoluzione FFT**

3 – Strumentazione – sorgente sonora



Segnale *sweep* esponenziale normale (a) ed equalizzato (b)

3 – Strumentazione – microfoni

- **MICROFONI**
  - Se il segnale x deve essere irradiato nel teatro per mezzo di un altoparlante omnidirezionale con risposta in frequenza lineare, all'uscita del "sistema acustico" il segnale dovrà essere acquisito da alcuni **trasduttori**
    - Oltre alla **testa artificiale** e al microfono **Soundfield** possono essere usati **normali microfoni omnidirezionali per le riprese monofoniche** (es. ripresa del tempo di riverberazione)

3 – Strumentazione – microfoni

- Misurazione della risposta all'impulso di tipo ORTF: **microfoni cardioidi**
- NORMA ISO 3382: prevede anche l'utilizzo di un **microfono bidirezionale con diagramma polare a "figura-di-otto"** per la misurazione di alcune proprietà del campo acustico
  - La risposta è massima per i suoni provenienti dal fronte o dal retro del microfono (angoli di incidenza 0° e 180°) mentre è nulla per i suoni provenienti dai lati (angoli di incidenza 90° e 270°)

3 – Strumentazione – schede audio

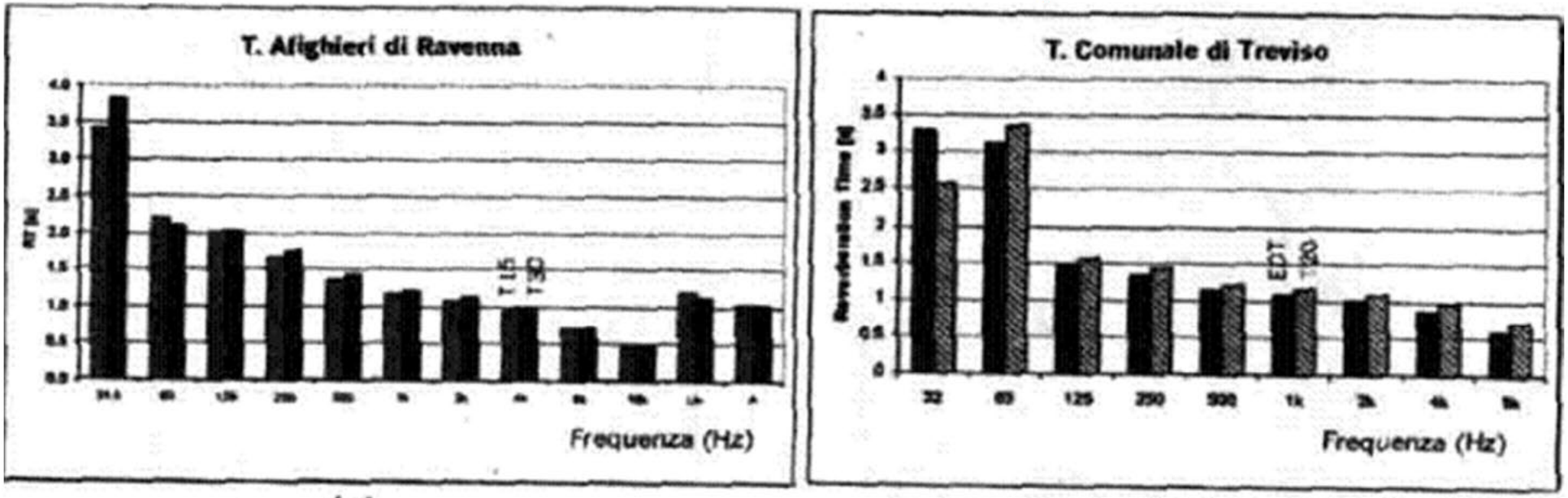
- Il segnale analogico proveniente dai microfoni dovrà essere acquisito almeno con risoluzione a **24 bit** e frequenza di campionamento di **96 kHz**, utilizzando convertitori analogico/digitali con risoluzione a **24 bit**
- Almeno **8 canali in ingresso** per poter effettuare misurazioni con più sorgenti sonore collocate in diverse posizioni del palcoscenico e della fossa d'orchestra, nonché:
  - un microfono Soundfield
  - una testa artificiale
  - due microfoni a cardioide

4 – Misura e rappresentazione dei parametri acustici

- Storicamente, il primo parametro fisico-acustico definito da Sabine, è il **tempo di riverberazione**
  - Normalmente sia il tempo di riverberazione che la risposta all'impulso vengono **misurati "a sala vuota"**
  - NORMA ISO 3382: prevede la possibilità di effettuare rilievi **"a sala occupata"** purchè venga indicato nella relazione tecnica
- L'andamento del tempo di riverberazione è in genere costante all'interno di un teatro; risulta più interessante misurare **l'andamento in frequenza del T60, differenziando i risultati a seconda dell'intervallo di decadimento considerato**

4 – Misura e rappresentazione dei parametri acustici

- Nei teatri all'italiana il tempo di riverberazione decresce all'aumentare della frequenza



(a) (b)

Tempi di riverberazione misurati nei teatri Alighieri di Ravenna (a) e Comunale di Treviso (b). Ravenna (a): T_{15} e T_{30}; Treviso (b) *EDT* e T_{20}

4 – Misura e rappresentazione dei parametri acustici

- Oltre al tempo di riverberazione esistono altri parametri fisici (tutti discendenti dalla risposta all'impulso) caratterizzanti la qualità acustica, raggruppati in categorie
  - **Parametri acustici energetici**
    - **Chiarezza C_{50} e C_{80}**
    - **Definizione D**
    - **Istante baricentrico (o tempo centrale) t_s (o CT)**
  - **Strength G**
  - **ITDG – Initial Time Delay Gap**
  - **Indici di intelligibilità**
  - **Parametri acustici per la spazializzazione**

4.1 – Parametri acustici energetici

- Considerano la parte iniziale della risposta all'impulso molto utile per la percezione della ricchezza del suono (***Energia utile***) a scapito della coda di riverberazione (***Energia dannosa***)
  - **Chiarezza C_{50}** e **C_{80}**: energia utile (il suono da 0 a 50 o 80 ms) / energia dannosa (il suono da 50 o 80 ms all'infinito)
    - Valori ottimali tra – 2 dB e + 2 dB

4.1 – Parametri acustici energetici

- I **valori di riferimento del C50** sono i seguenti:

-12 ÷ -6	=	pessima acustica
-6 ÷ +4	=	accettabile
+4 ÷ +10	=	buona
+10 ÷ +18	=	ottima

4.1 – Parametri acustici energetici

- I **valori di riferimento del C80** sono i seguenti:

  -12 ÷ -2 = musica per organo,

  -2 ÷ +6 = musica sinfonica,

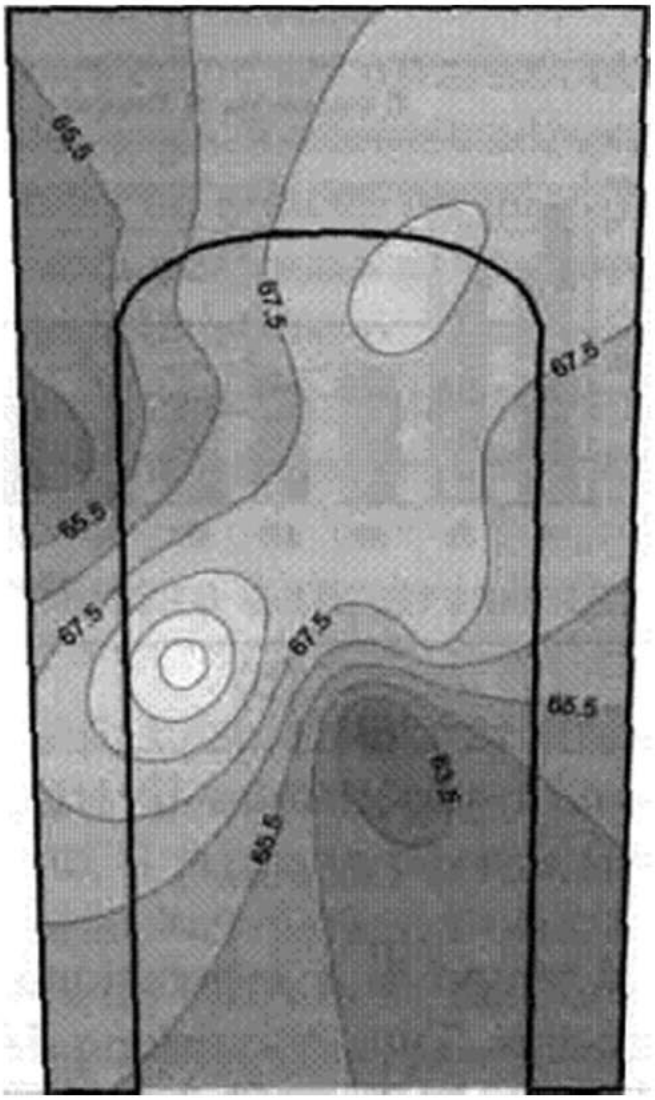
  +6 ÷ +10 = musica pop,

  +10 ÷ +18 = musica elettronica

4.1 – Parametri acustici energetici

- **Istante baricentrico t_s o *CT***
  - Rappresenta la distribuzione dell'energia che possiede la coda riverberante rispetto al campo diretto
  - Per la musica sinfonica il valore ottimale è tra 100 e 130 ms (sala molto riverberante, dotata di poca chiarezza)

Di fianco: Teatro 1763 di Villa Aldrovandi-Mazzacorati (BO)



4.1 – Parametri acustici energetici

- E’ anche **opportuno che le prime riflessioni arrivino all’ascoltatore da direzioni diverse da quella della sorgente**
  - in tal modo la percezione contemporanea del suono diretto e del suono riflesso provoca stimoli diversi alle due orecchie dando luogo alla cosiddetta ***sensazione spaziale*** o ***impressione spaziale*** legata alle caratteristiche fisiche della sala considerata.

4.1 – Parametri acustici energetici

- La definizione di **sensazione spaziale** comprende
  - la possibilità di localizzare la sorgente, cosa importante soprattutto nelle rappresentazioni teatrali,
  - la sensazione di trovarsi immersi in un campo sonoro tridimensionale in cui il suono arriva da più direzioni (sensazione di avvolgimento), cosa importante nell'ascolto di musica.
- Dal momento che queste sensazioni dipendono dalla differenza tra gli stimoli sonori che giungono alle due orecchie si comprende come solitamente nei teatri risultano sgradite le poltrone centrali della sala.

4.1 – Parametri acustici energetici

- **Strength *G***
  - Si tratta del **livello sonoro**
  - Misura il livello di pressione sonora normalizzato rispetto al livello di pressione della mia sorgente sonora misurato a 10m di distanza in campo libero (all'aperto)

  $$G = L_p - L_{p,10m}$$

  - Ovvero la differenza tra il livello di pressione sonora (L_p) e il livello di potenza (L_w) addizionato di 31 dB

4.1 – Parametri acustici energetici

- Dalla misura dello **Strength *G*** collocando la sorgente sonora in varie parti del palcoscenico e della fossa d'orchestra è possibile calcolare il ***balance***, ossia la variazione di energia acustica percepita nella sala al variare della posizione delle sorgenti, nel palcoscenico e nella fossa d'orchestra

4.2 – Initial Time Delay Gap

- **ITDG**: ***tempo di ritardo della prima riflessione***
  - Rappresenta il ritardo con cui viene percepita la prima forte riflessione nell'ambiente, dopo l'onda diretta ed esclusa la riflessione sul pavimento
- La sua determinazione sperimentale è problematica
  - Raramente dalla risposta all'impulso è possibile individuare univocamente una singola forte riflessione iniziale
- Non è citato nella NORMA 3382

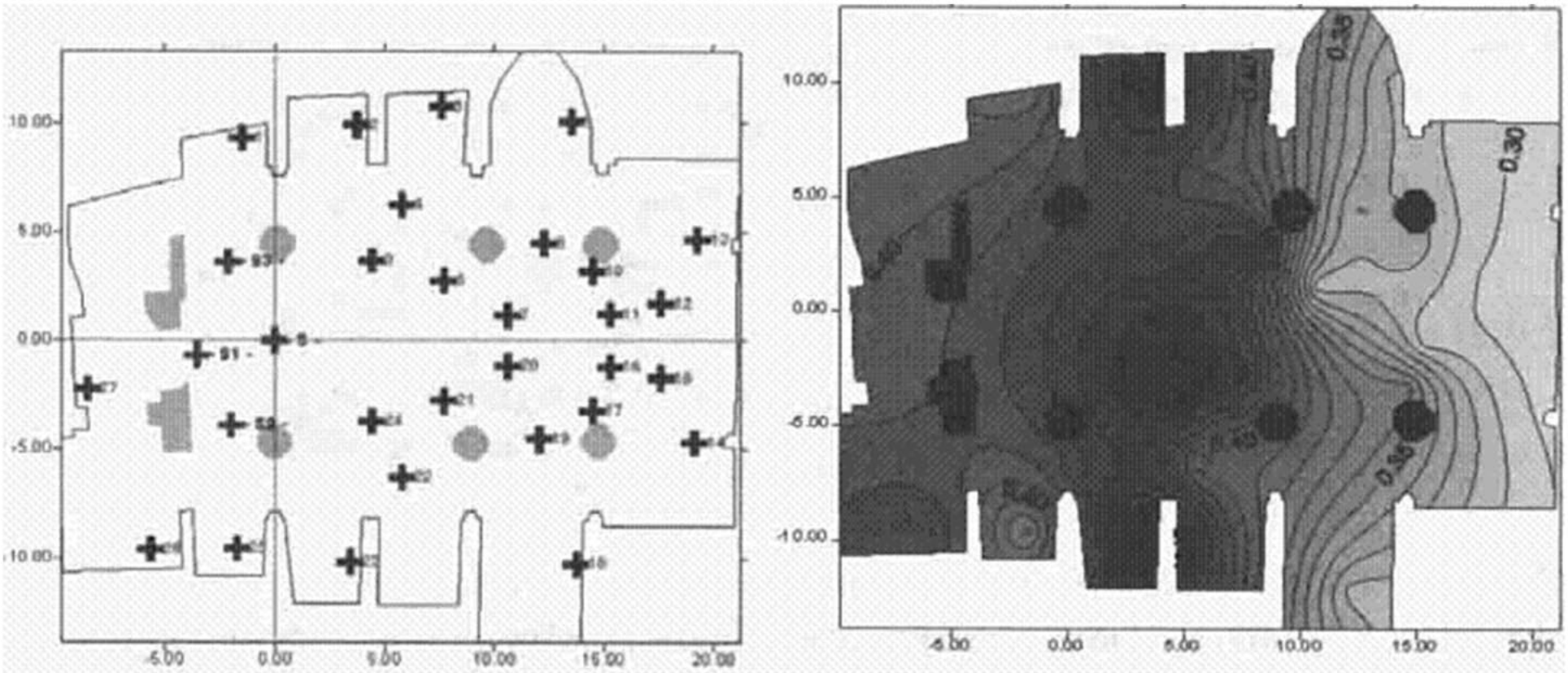
4.3 – Indici di intelligibilità

- L'**intelligibilità della parola** in una sala o teatro non è un parametro direttamente correlato con la produzione musicale
  - Interessa la partecipazione di cantanti e attori
  - L'indicatore principale è l'"**indice di trasmissibilità del parlato**" (**Speech Transmission Index *STI***)
    - Rapporto tra l'ampiezza della modulazione pervenuta al ricevitore e la corrispondente modulazione generata dalla sorgente (pink noise) per bande d'ottava tra 125 Hz e 8 kHz, con un'ampiezza modulata a una frequenza ***f*** bassa

4.3 – Indici di intelligibilità

- Variando la ***f*** (frequenza modulante) tra 0.63 e 12.5 Hz si ottengono 98 valori di MTF (funzione di trasferimento della modulazione), ovvero 14 dati per ciascuna delle 7 bande di ottava, in seguito mediati in un solo valore, **l'STI**.
- Se si usano solo le bande di 500 Hz e 2 kHz → **RapidSTI**, **RASTI**

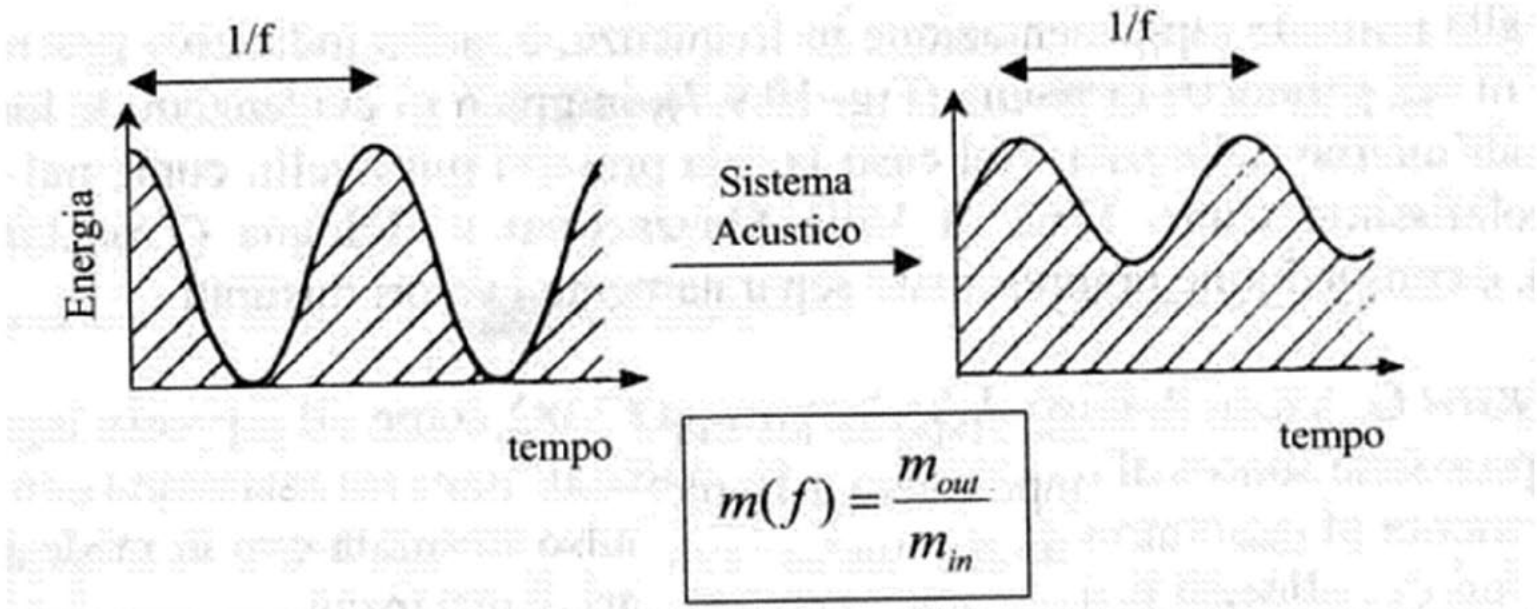
4.3 – Indici di intelligibilità



Auditorium del Carmine di Parma: a sinistra, distribuzione delle sorgenti e dei punti di misurazione; a destra, mappa della distribuzione dell' *STI* (Tronchin, 2000)

4.3 – Indici di intelligibilità

- Non incluso nella NORMA ISO 3382
  - Maggiore intelligibilità = **rapporto segnale/rumore elevato** e **tempo di riverberazione contenuto**



Funzione di trasferimento della modulazione *MTF*: a sinistra il segnale generato; a destra il segnale percepito

4.4 – parametri acustici per la spazializzazione

- Le registrazioni monoaurali non consentono di quantificare il grado di avvolgimento dell'ascoltatore all'interno di un teatro
  - È necessario avvalersi di trasduttori microfonici in grado di misurare risposte all'impulso binaurali e B-format
- La NORMA ISO 3382 prevede la misurazione di alcuni parametri in grado di quantificare la frazione di energia laterale percepita:
  - ***Frazione di energia laterale LF*** (MIC "8")
  - ***Efficienza laterale LE*** (MIC "8")
  - ***Cross-correlazione interaurale IACC*** (Testa artific.)

4.4 – parametri acustici per la spazializzazione

- **Efficienza laterale (*LE*)**
  - é dato dal rapporto fra l'energia che arriva lateralmente all'ascoltatore nel periodo che va dai 25 agli 80 ms successivi all'immissione nel locale di un segnale impulsivo (ad esempio un colpo di pistola), e l'energia totale che gli arriva nei primi 80 ms
  - deve essere misurato con un **microfono direzionale orientato in senso ortogonale alla direzione sorgente-ascoltatore**:

$$LE = \frac{energia_laterale_{(25 \div 80ms)}}{energia_totale_{(0 \div 80ms)}}$$

4.4 – parametri acustici per la spazializzazione

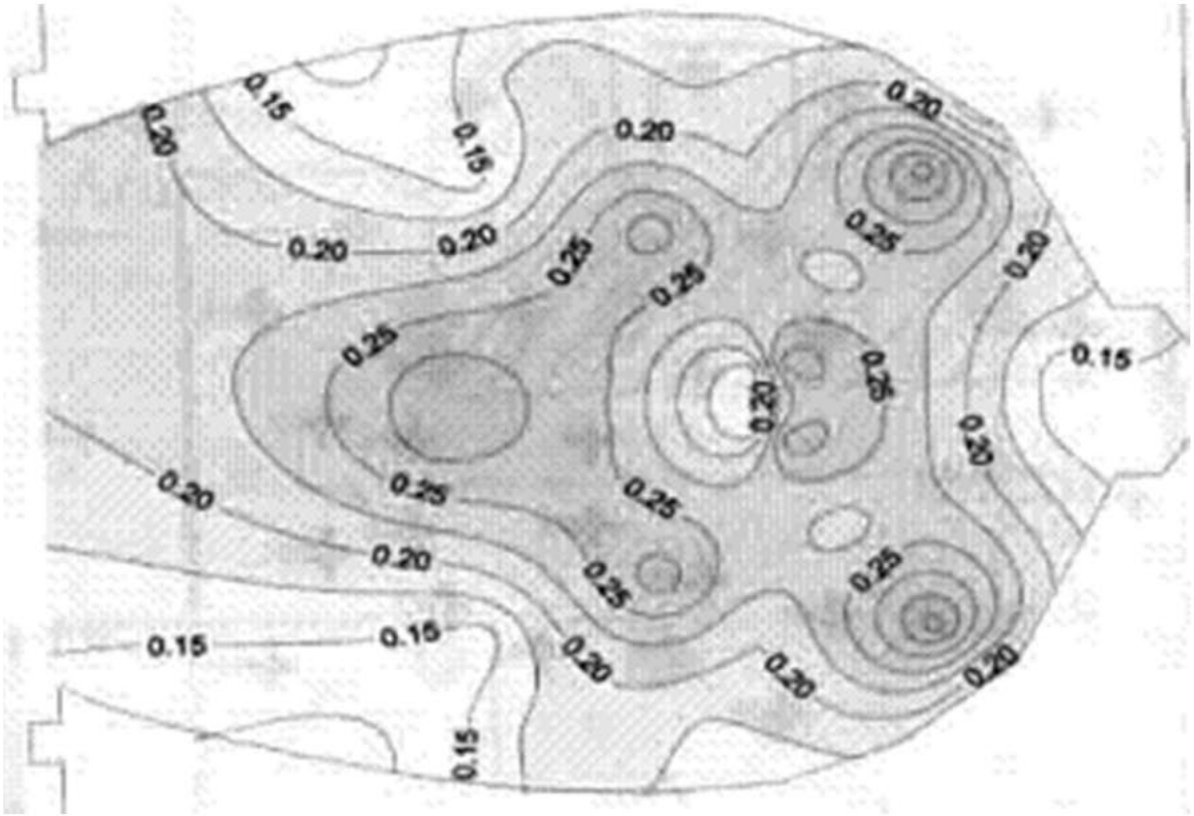
- **IACC**
  - tende a quantificare la sensazione dovuta alla differenza fra le pressioni sonore che giungono alle due orecchie
  - assume **valore nullo quando non c'è differenza di stimolo**
    - nel caso di solo suono diretto che giunge frontalmente
    - in caso di campo sonoro simmetrico rispetto all'ascoltatore.

4.4 – parametri acustici per la spazializzazione

- **IACC**
  - Calcolata rapportando le risposte all'impulso misurate ai due orecchi della testa artificiale secondo l'algoritmo di cross-correlazione tra i due segnali
  - Anche per bande d'ottava.
    - In tal caso è necessario filtrare a monte le risposte all'impulso prima di effettuare il calcolo della cross-correlazione

4.4 – parametri acustici per la spazializzazione

- Necessaria la **rappresentazione in pianta** per i parametri che descrivono le proprietà spaziali del campo acustico
  - **Correlati con la valutazione psico-soggettiva della qualità acustica**



IACC – Teatro La Fenice prima dell'incendio 1996

4.4 – parametri acustici per la spazializzazione

- Un **criterio progettuale** che emerge dalle considerazioni finora svolte é dunque quello di aumentare il coefficiente di riflessione in quelle superfici che possono dar luogo a riflessioni utili a rafforzare il suono diretto ed a fornire la sensazione spaziale e rendere invece fonoassorbenti quelle che potrebbero dar luogo a riflessioni con tempi di ritardo eccessivi.
- Le superfici riflettenti vanno orientate in modo opportuno, sfruttando i principi della riflessione geometrica, in modo da **dirigere le riflessioni utili nelle zone di ascolto**.

4.4 – parametri acustici per la spazializzazione

- Si ricorda che, affinché una superficie dia luogo ad una riflessione speculare del suono, **le sue asperità (o rientranze) devono avere dimensioni inferiori ad un quarto della lunghezza d'onda del suono incidente**, e **la lunghezza dei suoi lati non deve essere inferiore al quadruplo della stessa lunghezza d'onda**;
- in caso contrario, se la superficie è riflettente, si avrà solamente una **riflessione diffusa**

4.4 – parametri acustici per la spazializzazione

- Ricordando che **le lunghezze d'onda relative alle frequenze udibili variano da un minimo di circa 2 centimetri per un tono di 16000 Hz ad un massimo di circa 17 metri a 20 Hz**, si comprende che una stessa superficie può comportarsi in modo speculare nei confronti di certe frequenze e diffondente nei confronti di altre.
- Questo comportamento selettivo, unitamente al variare del coefficiente di assorbimento delle superfici con la frequenza, può dar luogo alla cosiddetta **distorsione in frequenza**
  - il segnale sonoro che giunge all'ascoltatore non ha lo stesso spettro, di quello emesso dalla sorgente.

5 – Tecniche di misura a confronto

- Non vi sono molti esempi in letteratura di misurazioni sperimentali di qualità acustica effettuate nel corso di numerosi anni all'interno della stessa sala (***ricerca longitudinale***)
  - Un esempio: Auditorium S. Domenico di Foligno

Parametro		**V. attesi**	**1986-90**	**1994**	**2001**
Early Decay Time	*EDT*	1,5 – 2,0 s	5,5 s	3,6 s	2,6 s
Tempo di riverberazione	*RT*	1,8 s	5,8 s	3,9 s	2,0 s
Chiarezza	*C80*	–2 ÷ +3 dB	–4,2 dB	–2,2 dB	–1,9 dB
Chiarezza	*C50*	–2 ÷ +3 dB	–5,5 dB	–2,7 dB	–2,1 dB
Definizione	*D50*	0,34 ÷ 0,60	0,40	0,51	0,51
Istante baricentrico	*Ts*	< 140 ms	570 ms	310 ms	220 ms
Strength	*G*	–2 ÷ + 4 dB	–1 ÷ +4 dB		–4 dB
Inter-Aural Cross-Correlation	*IACC*	0,12 ÷ 0,70	0,39 ÷ 0,71	0,33 ÷ 0,59	0,25 ÷ 0,50
Initial Time Delay Gap	*ITDG*	30 ms	40 ms	38 ms	36 ms

5 – Tecniche di misura a confronto

- Auditorium S. Domenico di Foligno
  - **Tre campagne di misura sperimentali** mediante **tecniche differenti**
  - 1986-90: pistola a salve
    - Ecogrammi sperimentali della risposta all'impulso salvati si DAT
  - 1994: tecnica MLS con testa artificiale
  - 2001: sweep esponenziale affiancato a una testa artificiale e a un microfono Soundfield

6 – La coda sonora

- Le prime riflessioni e le riflessioni successive costituiscono insieme la ***coda sonora***, vale a dire il prolungamento del suono diretto nell'ambiente per un certo tempo dopo l'interruzione dell'emissione.
- L'entitá di questo prolungamento é misurata da un descrittore fisico: il ***tempo di riverberazione*** (reverberation time **RT**), definito da Sabine come **il tempo necessario affinché, dopo l'interruzione dell'emissione da parte di una sorgente, il livello di pressione sonora nella sala diminuisse di 60 decibel**

6 – La coda sonora

- Il valore di questo parametro é funzione del **volume della sala** e dell'**assorbimento totale delle sue superfici interne**, dal momento che l'assorbimento dei materiali varia con la frequenza, anche il RT va calcolato alle varie frequenze.
- A parità di forma della sala **il RT aumenta linearmente all'aumentare delle dimensioni**.

6 – La coda sonora

- Il **valore ottimale del tempo di riverberazione** varia con il tipo di messaggio sonoro da trasmettere nella sala (parlato o musica di vario genere) / con la destinazione d'uso / e con le sue dimensioni.
  - massimo per la musica medioevale ed i concerti d'organo (2-4 s)
  - minore per l'opera (1.6 - 2.0 s)
  - musica classica (circa 1.8 s)
  - Musica barocca (minore di 1.5 s)
  - inferiore al secondo per l'ascolto del parlato.

6 – La coda sonora

- Un altro parametro di valutazione basato sullo stesso concetto del **RT** é l' **Early Decay Time** (**EDT**), ovvero il tempo necessario affinché, dopo l'interruzione dell'emissione sonora da parte di una sorgente, il livello di pressione sonora nella sala diminuisca di 10 dB.
  - normalizzato a 60 dB ma estrapolato dai primi 10, e senza aspettare il decadimento dei primi 5 dB come nel calcolo del RT.

6 – La coda sonora

- Nella tabella sono riassunti **i valori per i principali indici di valutazione in funzione del tipo di messaggio sonora da trasmettere nella sala**.
  - I valori **RT** sono riferiti al range 500-1000 Hz.

	RT (s)	C_{80} (dB)	C_{50} (dB)	D (%)	T_{bar} (ms)	ITDG (ms)	LE	EDT	RASTI
Musica									
d'organo	2,0÷4,0	-12 ÷ -2		< 50	50÷250	<= 70	> 0,2		
Corale	3,0÷3,5			,,	,,	,,	,,		
barocca	1,4÷1,6			,,	,,	,,	,,		
sinfonica	1,6÷1,8	-2 ÷ 6		,,	,,	,,	,,		
da camera	1,4÷2,0			,,	,,	,,	,,		
pop		+6 ÷ 10		,,	,,	,,	,,		
elettronica		+10 ÷ 18		,,	,,	,,			
Opera									
tedesca	1,8÷2,2						> 0,1		
italiana	1,4.÷1,8						,,		
Prosa	1,0÷1,2		>= -6	50 ÷100	0 ÷ 50	<= 50	> 0,1		>= 45
Confer.	<= 1,0		>= -6	,,	0 ÷ 50	<= 50	> 0,1		>= 45

7 – Parametri oggettivi e soggettivi nella valutazione del campo sonoro

- Il **tempo di riverberazione** ha costituito fino agli anni cinquanta del ‘900 il principale se non l’unico descrittore fisico del comportamento acustico di una sala, usato come parametro di valutazione oggettivo.
- Dagli anni cinquanta in poi sono stati sviluppati altri descrittori fisici (o fisico-acustici) del campo sonoro, o indici di valutazione oggettivi della qualità acustica di una sala (**SPL**, **ITDG**, **C50**, **C80**, **D**, **Tbar**, **LE**, **IACC**, **EDT**)

7 – Parametri oggettivi e soggettivi nella valutazione del campo sonoro

- Nel 1962 **L. L. Beranek** classificó formalmente **una serie di attributi soggettivi** del campo sonoro nelle sale legati in particolare al rapporto tra campo diretto e campo diffuso, sono:
  - la **pienezza del tono**, legata al rafforzamento del tono percepito dovuto alle riflessioni, alla permanenza del suono (lunghezza della coda sonora), dunque alla rilevanza (dominanza) del campo riflesso rispetto a quello diretto, nonché alla dominanza del segnale sonoro sul rumore di fondo (elevato rapporto S/R)

7 – Parametri oggettivi e soggettivi nella valutazione del campo sonoro

- Nel 1962 **L. L. Beranek** classificó formalmente **una serie di attributi soggettivi** del campo sonoro nelle sale legati in particolare al rapporto tra campo diretto e campo diffuso, sono:
  - la **definizione o chiarezza**, che rappresenta la capacità di distinguere suoni che si susseguono nel tempo, suoni emessi da strumenti diversi, essa é inversamente proporzionale al tempo di riverberazione della sala ed alla distanza sorgente-ricevitore.

7 – Parametri oggettivi e soggettivi nella valutazione del campo sonoro

- Le più recenti ricerche sono volte a correlare, mediante indagini statistiche basate su test di audizione in sale reali e questionari, alcuni dei descrittori fisici sopra elencati con il **giudizio soggettivo** degli ascoltatori, in modo da rendere prevedibile quest'ultimo in fase di progetto.
  - I questionari sono basati su tecniche di punteggio numerico tra due descrittori soggettivi contrapposti (quali: *gradevole - sgradevole*).

7 – Parametri oggettivi e soggettivi nella valutazione del campo sonoro

- Secondo una ricerca basata su questionari riferiti a test di ascolto in una serie di teatri italiani e sottoposti a professionisti del settore, é risultato ad esempio che:
  - **EDT** e **RT** sono legati alla coppia ***secco-rimbombante***: aumentano con la sensazione di diffusione
  - **ITDG** é legato alla coppia ***morbido-duro***, ed aumenta con la durezza del suono
  - **C80** é correlata con la coppia ***piacevole-spiacevole***, dall'indagine emerge una domanda di maggior chiarezza nelle sale italiane giudicate spiacevoli in quanto caratterizzate da bassi livelli sonori
  - **SPL** é correlato con la coppia ***piacevole-spiacevole***, la piacevolezza aumenta col **SPL** così come la componente riverberata (il rapporto **R/D**).

8 – Teoria di Ando

- Il ricercatore giapponese **Yoichi Ando**, sulla base di test svolti in un campo sonoro simulato, ha sviluppato un metodo per correlare quattro dei parametri oggettivi, fra loro indipendenti, **con un giudizio globale di preferenza soggettiva** esprimibile da un ascoltatore situato in un punto della sala.
- I quattro parametri utilizzati sono: **SPL**, **ITDG**, **IACC**, e **Tsub**, o tempo di riverberazione successivo (***Subsequent Reverberation Time***).
  - Quest'ultima grandezza è il tempo di riverberazione ottenuto mediante dei riverberatori elettronici nel campo sonoro simulato utilizzato nei test.

8 – Teoria di Ando

- Tenta di **correlare la qualità acustica di una sala ad una particolare tipologia di composizioni**
  - Viene calcolato un indice di preferenza complessivo S_i relativo ad una tipologia musicale mediante dei **fattori di peso da attribuire a 4 indici di preferenza relativi a 4 parametri acustici**

8 – Teoria di Ando

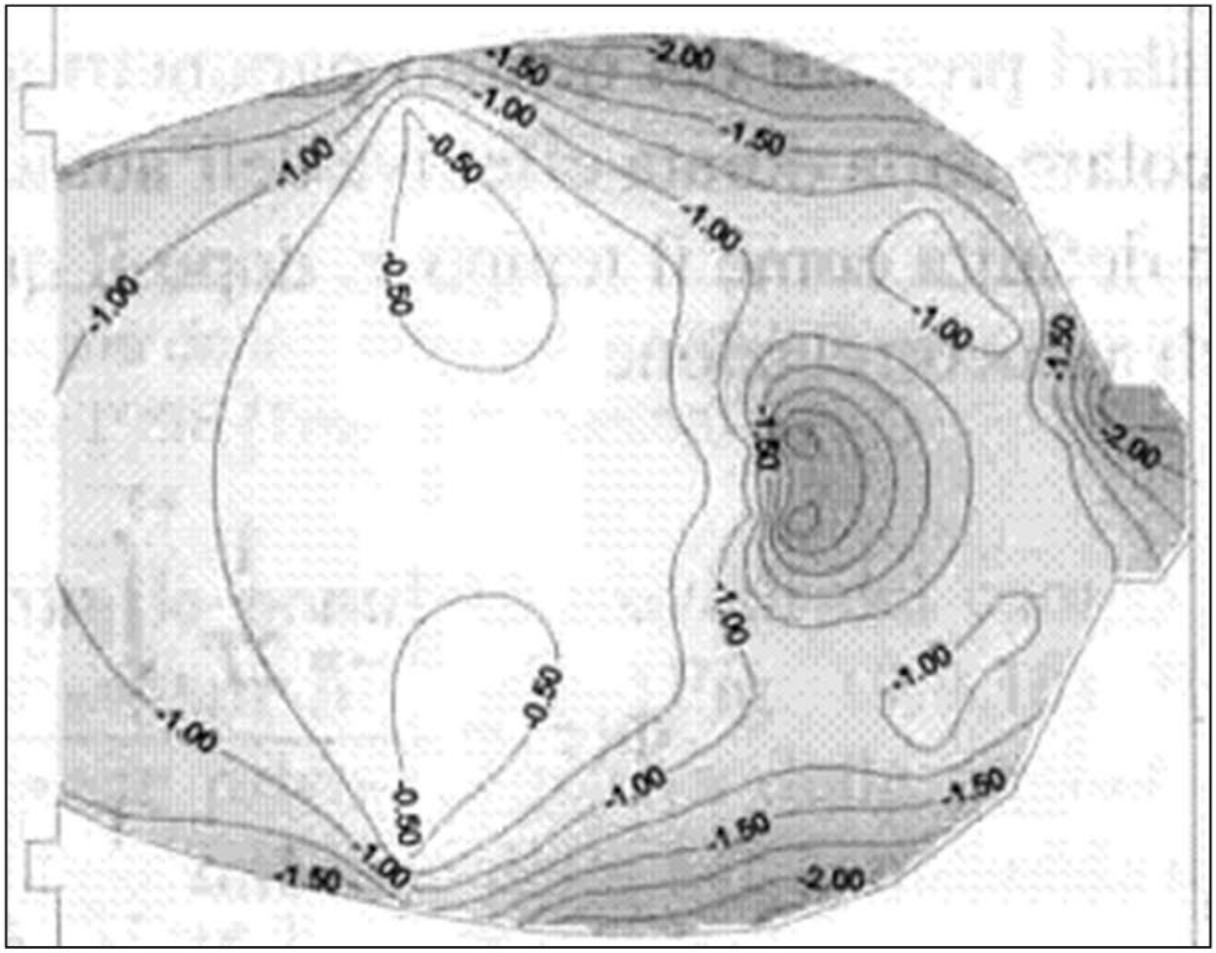
- I **valori preferiti** per ciascuna variabile sono stati ricavati da indagini psicoacustiche
  - In relazione al brano musicale
- I **fattori di peso** delle variabili sono stati determinati da indagini statistiche
- Ando ha fornito i valori misurati di alcuni brani musicali e del parlato, suggerendo il loro diverso utilizzo a seconda della destinazione d'uso della sala

8 – Teoria di Ando

- L'**indice di preferenza di Ando** indica uno scostamento da un valore ideale, posto uguale a zero.
  - Esso assume quindi sempre valori negativi.
    - All'aumentare della distanza da zero, la qualità diminuisce
  - Normalmente i valori si assestano intorno a -2, raramente qualche teatro si avvicina a -1, in determinate zone della sala (es. Teatro La Fenice prima dell'incendio [slide 71])

8 – Teoria di Ando

- Mappa di distribuzione spaziale dell'**indice di preferenza di Ando** nel Teatro La Fenice prima dell'incendio, registrato su Mozart (1996)



9 – Criteri progettuali

- **Non superare le distanze massime che consentono all'onda diretta di raggiungere l'ascoltatore con sufficiente livello di pressione.**
  - La presenza di questo vincolo impone l'uso di balconate qualora le esigenze di capienza della sala lo richiedano; in tal caso vanno però fatte delle opportune verifiche. Le balconate infatti comportano un aumento del volume della sala, con conseguente allungamento del tempo di riverberazione, e possono creare difetti acustici locali quali echi e zone d'ombra. Non vanno inoltre dimenticate le esigenze di visibilità.

9 – Criteri progettuali

- Rispettare i limiti nella **differenza di percorsi tra onda diretta e onda riflessa per evitare ritardi eccessivi**
  - vanno rese assorbenti tutte quelle superfici che darebbero luogo a onde riflesse con ritardo eccessivo.
- *In relazione a quanto detto sugli indici di chiarezza, la definizione e l'efficienza laterale, vanno garantite delle* ***prime riflessioni sufficientemente intense e provenienti da direzioni prevalentemente diverse da quella del suono diretto****.*

9 – Criteri progettuali

- Il **soffitto della sala** é in genere usato come riflettore nelle parti che possono dar luogo a riflessioni utili, le più vicine alla sorgente sonora
  - inclinato verso il basso procedendo verso il fondo della sala per evitare eccessivi percorsi dell'onda riflessa
  - inclinato in senso contrario per indirizzare le riflessioni nocive fuori dell'area occupata dal pubblico.
- Queste riflessioni devono essere **speculari nel caso del parlato**, **diffuse nel caso della musica sinfonica**.
  - Quest'ultimo effetto può essere ottenuto dando al soffitto una forma ondulata.

9 – Criteri progettuali

- Anche le **pareti laterali** vengono sfruttate come riflettori ma solo se le dimensioni della sala sono limitate in larghezza (inferiori ai 20-25 metri).
- Una **pianta rettangolare** consente in genere una buona distribuzione del suono riflesso, mentre una **pianta a ventaglio** tende a privilegiare le posizioni più lontane.
- Le sale piatte e larghe, soprattutto quelle a ventaglio, tendono a ridurre l'impressione spaziale, data la scarsa rilevanza delle prime riflessioni laterali che vengono indirizzate verso il fondo.
- Le **pareti di fondo** vengono in genere rese fonoassorbenti in quanto darebbero luogo a percorsi eccessivamente lunghi dell'onda riflessa.

9 – Criteri progettuali

- **Qualora pareti laterali e soffitto non possano dar luogo alle necessarie riflessioni utili, si può ricorrere, per ottenerle, a riflettori acustici (in genere sospesi)**
  - opportunamente posizionati e conformati, la loro massa frontale non dovrà essere inferiore a 15-20 kg per m2.
  - L'uso di **elementi riflettenti discontinui sospesi al di sotto di un soffitto anch'esso riflettente** consente di ottenere il valore desiderato dell'ITDG senza ridurre il volume della sala dunque senza penalizzare eccessivamente il tempo di riverberazione.

9 – Criteri progettuali

- Affinché il campo sonoro sia uniforme bisogna perseguire una **forma compatta** (una dimensione non deve eccedere troppo rispetto alle altre),
  - qualcuno suggerisce di accentuare l'altezza rispetto alla larghezza per evitare delle riflessioni dal soffitto che possano precedere le riflessioni laterali (riducendo l'EL) e mascherare il suono diretto.

9 – Criteri progettuali

- Nel caso delle **sale polifoniche** le riflessioni utili vanno indirizzate non solo verso la platea ma anche verso l'orchestra per consentire agli esecutori di ascoltare la propria esecuzione ed accordarsi tra loro.
- Rendere **leggermente divergenti le pareti opposte (se riflettenti)** per evitare l'***effetto flutter*** ovvero le riflessioni multiple reciproche, ed anche la creazione di onde stazionarie.

9 – Criteri progettuali

- Le riflessioni dannose sono non solo quelle che arrivano all'ascoltatore con tempi di ritardo e contenuto energetico eccessivi, ma anche quelle che, a causa della forma della superficie riflettente, **tendono a focalizzare l'energia sonora in alcuni punti, o a creare zone d'ombra provocando disuniformità del campo sonoro**.
  - In questi casi si rendono fonoassorbenti le superfici che darebbero luogo a tali fenomeni oppure si introducono strutture diffondenti.

9 – Criteri progettuali

- In tutti i casi va **minimizzato con opportuni provvedimenti fonoisolanti il rumore di fondo** (dunque **aumentato il rapporto segnale-rumore S/R**)
  - sia quello proveniente dall'esterno attraverso pareti ed aperture, sia quello generato all'interno dell'edificio dagli impianti e dalle eventuali macchine sceniche.