

CRITERI DI VALUTAZIONE OGGETTIVI E SOGGETTIVI DELLE PRESTAZIONI ACUSTICHE DEGLI AMBIENTI DI ASCOLTO

1. PREMESSA

Le sale dedicate al pubblico possono essere suddivise in due grosse categorie: quelle ove vengono offerti al pubblico particolari servizi e quelle ove vengono svolte, per il pubblico, particolari funzioni. Nella prima categoria si elencano tutte le sale in cui il pubblico può accedere liberamente ed è fruitore di servizi; si pensi alle grosse sale di attesa degli aeroporti, delle stazioni ferroviarie, alle sale di banche, ristoranti, supermercati, musei etc. Nella seconda categoria, invece, si elencano le sale aperte al pubblico per spettacoli: se le più note sono i teatri, gli auditorium, i cinematografi, le discoteche, le sale convegni, fanno parte di questa categoria anche le chiese, le sale polifunzionali, i palazzetti dello sport etc.

Questa prima classificazione evidenzia in origine requisiti e prestazioni acustiche diversi per le due categorie di ambienti aperti al pubblico. Le prestazioni acustiche richieste alla prima categoria di sale rientrano nel conseguimento di quelle condizioni ambientali globali comunemente denominate comfort o situazione di benessere psicofisico. Quelle richieste alla seconda categoria, invece, sono più mirate all'acustica che gioca un ruolo fondamentale in quanto il buon ascolto è un requisito primario insieme alla buona visione dello spettacolo.

I requisiti acustici essenziali per conseguire una qualità di benessere esulano dalla presente trattazione e si traducono in prestazioni connesse con la difesa dal rumore di origine interna ed esterna alla sala, in qualità acustiche dello spazio chiuso in cui è importante la riduzione dell'intensità del campo sonoro riverberato, ed in alcuni casi ove si rende necessaria la comprensibilità di annunci e messaggi diffusi da sistemi di altoparlanti opportunamente distribuiti nell'ambiente. Quest'ultimo requisito, quasi sempre disatteso nella pratica, riveste un ruolo fondamentale nelle sale d'attesa di aeroporti e stazioni ferroviarie dove gli annunci al pubblico sono di prioritaria importanza. Una cattiva progettazione dell'acustica di questi spazi destinati al pubblico mette a dura prova l'efficacia degli impianti di diffusione sonora (sovente anch'essi mal progettati) tramutando l'annuncio atteso, importante per alcuni, in un rumore fastidioso, e quindi inquinante, per altri. Una appropriata progettazione dell'acustica della sala unitamente ad una idonea ed estesa rete di diffusori a basso livello sonoro realizzano una ottima comprensione del messaggio senza peraltro arrecare disturbo a coloro che non sono interessati all'annuncio.

Nei capitoli che seguono si svilupperanno gli aspetti legati ai requisiti acustici delle diverse sale ed alla verifica delle prestazioni, mentre non potranno essere affrontati, per la dimensione della trattazione, gli aspetti progettuali che costituiscono un notevole ed importante capitolo dell'acustica. Nella realtà professionale, infatti, i locali di pubblico spettacolo sono soggetti a severe norme imposte da precise Circolari del Ministero dell'Interno e da numerosi Decreti Ministeriali che lasciano poco spazio all'utilizzo di materiali di tipo "tradizionale".

Il progettista dell'acustica, oggi, è fortemente impegnato nella ricerca di soluzioni alternative alle soluzioni tradizionali adottate in passato proprio per mantenere non solo i requisiti di acustica ma anche, e soprattutto, per soddisfare appieno le norme di sicurezza e di prevenzione incendi. Si ricorda, infatti, che la Circolare del Ministero dell'Interno n. 16 del 15 febbraio 1951 definisce le norme di sicurezza per la costruzione, l'esercizio e la vigilanza di teatri, cinematografi ed altri locali di spettacolo in genere. A partire dagli anni '80, a seguito di tragici eventi verificatisi in alcuni cinematografi, la vigilanza sui locali si è fatta più severa per

cui, anche a livello di nulla osta preventivo ovvero in deroga ai decreti citati, l'impiego di materiali rispondenti alle più severe norme antincendio sono assolutamente imposti. Malgrado ciò abbiamo assistito negli ultimi anni alla distruzione per incendio di due dei più prestigiosi teatri d'opera italiani. Questo significa che le autorizzazioni in deroga, fatte salve le prescrizioni imposte dalle Commissioni di Vigilanza e dai Vigili del Fuoco, non sono sufficienti a garantire l'incolumità delle opere e del pubblico. La prima a patire di questa giusta restrizione è l'acustica delle sale, e la causa di questo degrado qualitativo non è da imputarsi alle severe norme di sicurezza ma agli studiosi di acustica tecnica che non hanno sviluppato sufficientemente le ricerche scientifiche per individuare i materiali più idonei a soddisfare entrambi i requisiti dell'Acustica e della Sicurezza. Come apparirà chiaro più oltre i ricercatori, anche negli ultimi anni, hanno rivolto la loro attenzione scientifica a descrivere e quantificare le prestazioni acustiche delle sale proponendo numerosi parametri più o meno utili a capire il meccanismo che genera la qualità necessaria per un buon ascolto in sala. Nessuno, però, ha affrontato il problema progettuale di come dimensionare l'opera e di come scegliere i materiali più idonei per conseguire i requisiti richiesti. Non esistono infatti studi che, seguendo un protocollo preciso ed unico, caratterizzino l'acustica attuale delle sale più prestigiose che hanno superato, fino ad oggi, l'incuria degli uomini. Non esistono studi mirati ad individuare le caratteristiche acustiche dei materiali utilizzati nel '700 e nell'800 per costruire i teatri d'opera italiani, e, soprattutto, non esistono studi e proposte di soluzioni tecniche per consentire il recupero ed il restauro dei teatri e delle sale da musica, patrimonio storico dell'arte italiana. Questa carenza si tramuta in danno indescrivibile ed irrecuperabile perpetrato a danno di edifici prestigiosi quando improvvisati acustici sottopongono le sale al restauro conservativo e funzionale secondo criteri non del tutto consoni ai canoni della vera acustica. Il consolidamento non appropriato delle strutture che partecipano alla trasmissione del suono in sala e l'impiego di materiali acusticamente non adatti possono creare alterazioni dell'acustica rilevabili in parte dalla misura oggettiva delle prestazioni acustiche in sede di collaudo ma, soprattutto "sentite" dalle persone più qualificate tra il pubblico e, principalmente, avvertite dagli attori e dai musicisti che lavorano nello spazio così realizzato quando tentano di utilizzare l'acustica per la buona riuscita della loro interpretazione.

2. I REQUISITI ACUSTICI DELLE SALE PER SPETTACOLO

Per requisiti acustici delle sale destinata al pubblico è da intendersi, brutalmente, una serie di specifiche tecniche che costituiscono la base per la progettazione esecutiva delle opere di acustica. Nella pratica professionale, anche in coerenza con la legge 109/94 (legge quadro per appalti speciali) è il progetto preliminare che definisce le caratteristiche qualitative e funzionali dei lavori (art.16 comma 3). E' in questa fase che vengono definiti i requisiti che costituiranno la base per la redazione prima del progetto definitivo (art. 16 comma 4 della citata legge) e poi del progetto esecutivo (art. 16 comma 5). Per quanto riguarda la progettazione delle opere di acustica, i requisiti si individuano di volta in volta e sono diversi a seconda della destinazione d'uso della sala.

Riqualificando l'opera del progettista di acustica nel contesto delle altre specializzazioni si asserisce, senza temere smentite, che, quando i requisiti di acustica per l'opera sono prioritari, la sua prestazione si pone sullo stesso piano, per creatività, dell'architetto che ne cura le forme. In questo caso non sono sufficienti, seppure necessarie, la padronanza dei mezzi di calcolo bensì assumono un ruolo importante l'intuizione e la sensibilità del professionista di acustica. Questo è dimostrato dalla particolare natura che caratterizza i requisiti di acustica delle diverse sale per il pubblico e che sfuggono ad una mera tabulazione di parametri. Nella presente trattazione si affronta, per il limitato spazio disponibile, soltanto la descrizione dei requisiti acustici delle sale utilizzate per convegni e per spettacolo. Ovviamente la distinzione dell'uso delle sale non è così categorica ma si articola in sfumature più o meno evidenti ma tutte di pari importanza.

2.1 SALE PER LA MUSICA

Appartengono a questa categoria di sale gli auditorium ove il pubblico beneficia del concerto fornito da un'orchestra in una determinata area. I requisiti acustici della sala sono strettamente legati alle esigenze degli utilizzatori che si distinguono in esecutori e ascoltatori della musica. Si distingueranno quindi i requisiti acustici per l'ascoltatore ed i requisiti acustici per l'esecutore.

La più completa ed approfondita descrizione delle caratteristiche acustiche di una sala è, a tutt'oggi, quella effettuata da Beranek nel celebre volume *"Music, Acoustic & Architecture"* (1962). L'originalità del lavoro risiede nel fatto di aver per primo individuato, definito e quantificato una serie di attributi qualitativi dell'acustica di una buona sala da concerto partendo da minuziose inchieste presso i più qualificati direttori d'orchestra e i critici musicali dell'immediato dopoguerra. L'opera di sintesi effettuata dall'autore gli ha consentito di definire i requisiti essenziali che deve possedere una sala per concerti partendo dalla convinzione che il locale partecipa in modo importante alla intensificazione, diffusione, strutturazione del messaggio musicale, così come la stessa cassa armonica degli strumenti di una orchestra è responsabile della qualità del suono da essi prodotto. Ne scaturisce una serie di attributi qualitativi che una sala deve possedere per soddisfare sia le esigenze di colui che produce la musica sia di colui che l'ascolta.

Per il pubblico, banalmente, la buona acustica di una sala si traduce in termini di un buon ascolto della musica prodotta. Questo lega le qualità di carattere soggettivo di natura psico-acustica a fenomeni fisici di acustica legati alle proprietà del campo sonoro nel punto di ascolto. La trasmissione di energia sonora da un punto sorgente (orchestra) ad un punto ricevente della sala (spettatore) avviene per onde acustiche che pervengono all'ascoltatore sia direttamente dalla sorgente sia per riflessione dalle pareti della sala.

Brutalmente il segnale musicale prodotto dall'orchestra consiste in una combinazione di suoni che variano con continuità o con discontinuità nel tempo, con cadenze ritmiche e non, con variazioni continue di altezza, di timbro, d'intensità tutte organizzate per comunicare un messaggio. Risulta quindi, nel punto di ascolto, un mescolarsi di onde dirette e riflesse che determina la qualità della musica.

Esteticamente più qualificato, il segnale musicale è espressione di un sentimento e di una idea legata al compositore che ha operato nell'ambito di uno stile musicale. Si pensi alle differenze che caratterizzano ad esempio il Canto Gregoriano da una composizione organistica di Bach da un concerto per piano di Mozart da una sinfonia di Beethoven. I diversi autori hanno composto le loro opere ricercando, nelle caratteristiche acustiche dell'ambiente, gli effetti espressivi più consoni alla loro sensibilità ed idea compositiva. Valga per tutti l'esempio delle lunghe pause iniziali della Toccata e Fuga in Re minore di Bach ove la riverberazione di una grossa cattedrale è la protagonista indiscussa della Toccata. Per le sonorità ed i fraseggi mozartiani, invece, il lungo tempo di riverberazione della sala sarebbe assolutamente nefasto.

La sala interviene sul suono musicale prodotto dall'orchestra in diversi modi:

- ⇒ attenuando l'energia stessa durante la propagazione nell'aria;
- ⇒ alterando lo spettro di emissione dell'onda sonora dopo la riflessione sulle pareti e soffitto;
- ⇒ aggiungendo al suono l'effetto della riverberazione;
- ⇒ alterando le relazioni di ampiezza e temporali di aliquote di energia sonora che globalmente determinano il suono ricevuto in un determinato posto.

Si esemplificano in parte questi concetti considerando il segnale di una emissione sonora di tipo impulsivo ricevuto in un determinato posto. L'*ecogramma* di un colpo di pistola esploso in sala, Fig. 1, evidenzia il **suono diretto** (energia che dalla sorgente giunge direttamente all'ascoltatore), le **prime riflessioni** (prodotte dal pavimento, dalle pareti e dal soffitto) e la **coda sonora** o processo della riverberazione (prodotta dalle successive riflessioni del suono).

Il suono che giunge all'ascoltatore è determinato dall'onda sonora diretta alla quale si sovrappongono le molteplici riflessioni delle pareti laterali e di tutti gli elementi architettonici riflettenti e diffondenti che modificano queste per effetto della particolare forma e costituzione dall'ambiente. Nell'area destinata al pubblico l'ascoltatore lo percepisce soggettivamente mediante il meccanismo di ricezione binaurale ed elaborazione del segnale a livello celebrale. Tutto poi è complicato dalla complessità del suono musicale come precedentemente definito.

Questi processi percettivi sono alla base della vasta gamma di impressioni soggettive che contribuiscono tutte a creare una immagine sonora di qualità per l'ascoltatore. Appare evidente, quindi, che le qualità acustiche di una sala vista dal pubblico, e quindi i requisiti ai quali la stessa deve rispondere, possono essere espressi solo con termini di tipo qualitativo che descrivono particolari esigenze di tipo percettivo. Questi, poi, devono essere tradotti in elementi tecnico costruttivi dal professionista di acustica per realizzare l'opera rispondente alle richieste.

Beranek, nell'opera citata, consapevole di questa necessità progettuale, ha definito, con l'aiuto delle interviste condotte, le qualità in assoluto del suono di natura musicale correlando queste con le qualità del suono percepito dall'ascoltatore in sala ed alterato dall'acustica della sala stessa.

Le qualità del segnale musicale influenzate dal processo di acustica introdotto dalla sala sono state così individuate:

- **Pienezza del tono:** corrisponde ad una maggiore intensità soggettiva (loudness) in ambiente raggiungibile con una minore potenza sonora emessa, una maggiore permanenza del suono dopo che è cessata l'emissione, un maggiore livello di suono sul rumore di fondo ed una maggiore aliquota dell'energia riverberata rispetto a quella diretta. Questa qualità musicale è quindi legata all'entità del tempo di riverberazione ed alla intensità del suono diretto. La riverberazione dipende dal volume e dalle caratteristiche fonoassorbenti dei materiali, l'intensità del suono diretto dipende dalla distanza dell'ascoltatore. La forma della sala ed i materiali impiegati influiscono enormemente sulla pienezza del suono nel senso che più grande è il rapporto tra intensità soggettiva del suono riverberato e quella del suono diretto più elevata è la sensazione di pienezza del tono musicale.

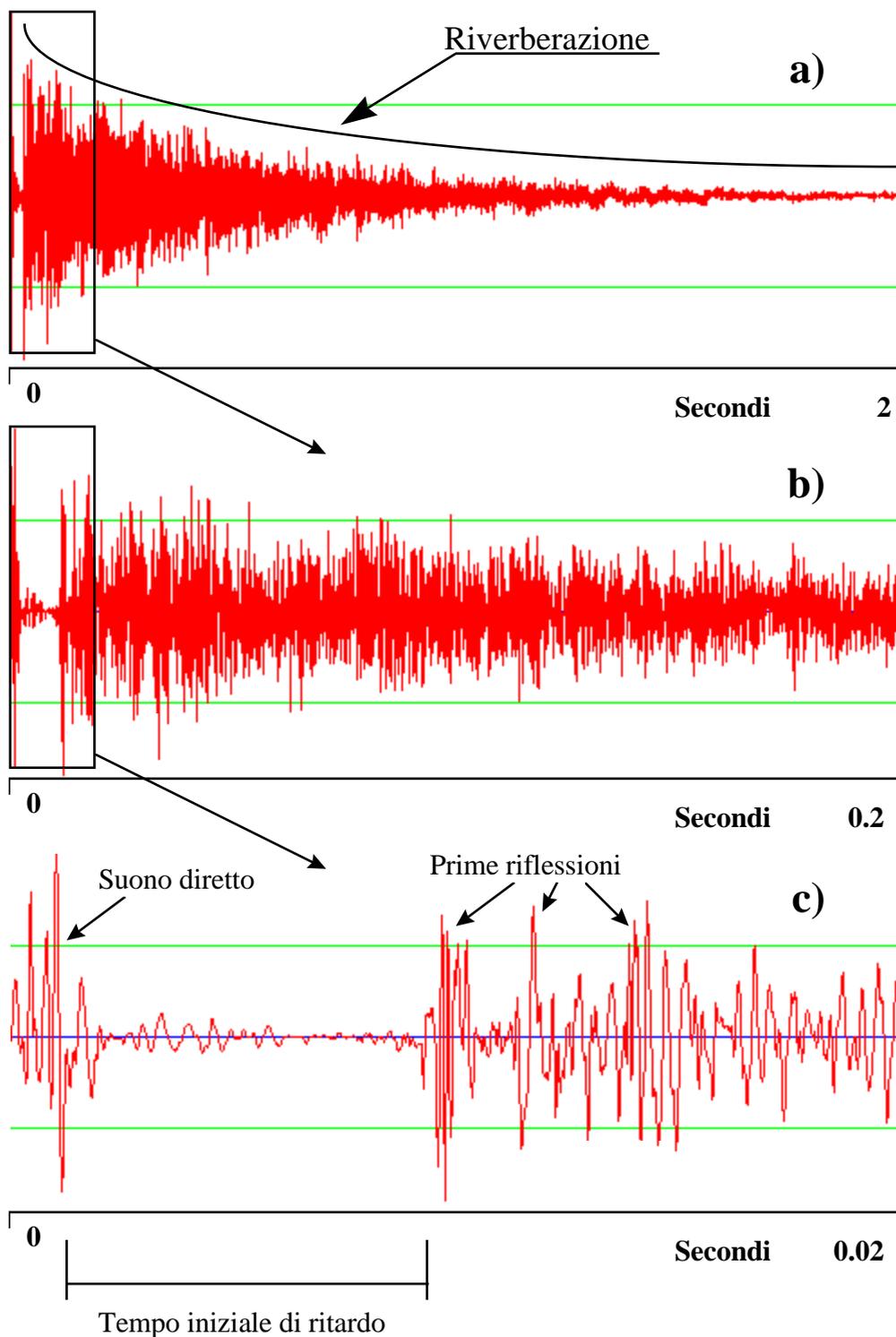


Fig.1 - a) Ecogramma di un colpo di pistola esploso nell'area d'orchestra e ricevuto in sala **b)** 200 ms di segnale iniziale **c)** 20 ms di segnale iniziale.

Definizione o chiarezza: rappresenta la capacità di distinguere suoni che si susseguono nel tempo (*chiarezza orizzontale*) o che giungono simultaneamente da diversi strumenti (*chiarezza verticale*). La chiarezza orizzontale è influenzata dalla durata della riverberazione e dal rapporto tra suono diretto e suono riverberato, cioè dagli stessi due fattori che determinano la pienezza del tono ma in senso inverso: essa risulta tanto maggiore quanto minore è il tempo

di riverberazione. E' comunque influenzata negativamente dalla distanza dell'ascoltatore dalla sorgente e dall'entità del suono riverberato rispetto a quello diretto. La sensazione di chiarezza di un tono musicale è intesa come percezione del segnale tenendo conto che l'orecchio stabilisce una relazione tra la prima parte del segnale e la successiva: vi è chiarezza orizzontale quando la seconda non è così forte da coprire la prima. La chiarezza verticale, invece, è influenzata dal bilanciamento e fusione del suono di due o più strumenti che emettono contemporaneamente, dal grado di armonizzazione dei suoni dei diversi strumenti, dalla risposta della sala alle basse, medie ed alte frequenze e dal rapporto tra suono diretto e suono riverberato. La definizione dei toni musicali sia nel senso orizzontale che in quello verticale è determinata da un insieme di fattori acustici e musicali. Il canto gregoriano, ad esempio, con le sue lente variazioni melodiche ed intensive (arsi e tesi) è eseguito necessariamente con povera definizione orizzontale: esso richiede una sala con un tempo di riverberazione molto elevato e con un basso rapporto tra suono diretto e suono riverberato. Un concerto per pianoforte di Mozart, con i suoi rapidi fraseggi, i delicati equilibri, richiede una elevata chiarezza orizzontale e verticale tra il piano e le differenti voci orchestrali e quindi richiede un tempo di riverberazione relativamente breve ed un elevato rapporto tra energia diretta ed energia riverberata.

Le due qualità musicali sopra descritte (pienezza del tono e chiarezza) influenzano enormemente la risposta di un brano musicale suonato rapidamente o lentamente. La percezione delle note può essere compromessa se la rapidità temporale di esecuzione è molto breve rispetto al tempo di riverberazione. Se poi lo strumento stesso produce suoni affetti anch'essi da risonanza (o coda sonora generata da un basso smorzamento ad esempio della tavola armonica) la chiarezza del brano può essere compromessa ancora maggiormente. Tipico è il caso del pianoforte che possiede esso stesso il mezzo tecnico per aumentare o ridurre la "durata della risonanza". E' facile intuire come note successive emesse rapidamente possano risultare ancora distinguibili nel senso della chiarezza orizzontale se il tempo di riverberazione dell'ambiente è basso, mentre le stesse note risulterebbero sepolte dalla riverberazione e quindi confuse se il tempo di riverberazione risulta eccessivamente elevato. Il pianoforte, per essere ben ascoltato, richiede dall'ambiente un tempo di riverberazione relativamente breve in quanto il pianista stesso può prolungare l'emissione sonora con i pedali.

I requisiti delle sale per musica sono tutti esprimibili in termini qualitativi di impressioni soggettive che però raccolgono un ampio consenso di opinioni tra i musicisti e gli ascoltatori più raffinati; essi sono stati elencati da Beranek che li ha studiati anche al fine di procedere, mediante parametrizzazione, alla suddivisione in classi di qualità dei diversi teatri ed auditorium da lui indagati. Gli attributi soggettivi sono:

- 1) *Intimità o presenza*: è legata all'impressione soggettiva che un ascoltatore prova in relazione alle dimensioni fisiche della sala di ascolto. Quantitativamente è legata al tempo iniziale di ritardo, cioè al ritardo tra suono diretto e prima riflessione. Le sale definite intime e con buona sensazione della presenza dello strumento musicale sono quelle che hanno ispirato la definizione di "musica da camera". I quartetti di archi in auge nell'arte musicale del settecento ed ottocento, ad esempio, hanno ispirato i compositori i quali erano ben consapevoli dell'acustica e dell'ambiente intimo di corte ove i loro brani venivano eseguiti anche perché commissionati dagli stessi signori. Camere di questo tipo sono caratterizzate da un breve tempo iniziale di ritardo (inferiore a 20 ms) e l'intensità soggettiva del suono diretto risulta molto più elevata del suono riverberato.
- 2) *Vivezza*: una sala viva è caratterizzata da un tempo di riverberazione alto alle medie ed alte frequenze; una sala asciutta o morta è caratterizzata da un breve tempo di riverberazione. La vivezza di una sala rivela la presenza di pienezza dei toni. Una sala viva, al contrario, rivela una carenza di bassi.
- 3) *Calore*: Rappresenta la pienezza dei toni a bassa frequenza (inferiori a 250 Hz). E' quindi caratterizzata da un lungo tempo di riverberazione alle basse frequenze. L'eccessiva

- riverberazione, però, rende la sala rimbombante specialmente se di piccole dimensioni. Molte sale vengono definite “calde con ricchezza dei bassi”.
- 4) *Intensità soggettiva (loudness) del suono diretto*: Il suono percepito da un ascoltatore è la somma del suono diretto e di quello riverberato. Nelle piccole sale il suono diretto raggiunge anche le ultime file del pubblico mentre in quelle grandi le ultime file sono investite prevalentemente da suono riverberato. Il giusto equilibrio si ottiene usualmente a 20 m dall’orchestra.
 - 5) *Intensità soggettiva (loudness) del suono riverberato*: Rappresenta il suono che giunge all’ascoltatore dopo una o più riflessioni. Essa è necessaria per contribuire a rendere efficaci i passaggi “fortissimo” che sarebbero poco rappresentativi se si facesse affidamento al solo suono diretto. Una elevata riverberazione intensifica questa parte di suono ricevuto. Per contro una sala con elevato volume ed elevato assorbimento (breve tempo di riverberazione) rende poco nei passaggi “fortissimo”. Si rileva che se una sala è piccola ed altamente riverberante il livelli dei fortissimo possono essere tali da offendere l’udito dei musicisti e degli ascoltatori.
 - 6) *Chiarezza*: Una sala priva di definizione o chiarezza, come definita in precedenza, rende la musica confusa ed opaca. La chiarezza è legata alla struttura delle riflessioni ed è quindi legata all’intimità. E’ anche funzione del tempo di riverberazione e quindi legata alla vivezza; è funzione della distanza dell’ascoltatore dall’orchestra e quindi è legata all’intensità soggettiva del suono diretto; è funzione del volume della sala e quindi è legata all’intensità soggettiva del suono riverberato.
 - 7) *Brillanza*: indica la vivacità di un suono argentino, con grande ricchezza di armoniche. Essa si percepisce in un ambiente vivace alle alte frequenze, con elevata chiarezza ed intimità. Dipende, quindi, dal tempo iniziale di ritardo, dal rapporto tra il tempo di riverberazione alle alte frequenze e quello alle medie frequenze, dalla distanza dell’ascoltatore, e dalla presenza in sala di ampie superfici riflettenti.
 - 8) *Diffusione*: indica la direzione di arrivo del suono riverberato nel senso che ad una buona diffusione corrisponde l’assenza di direzioni privilegiate di provenienza del campo riverberato. Essa si manifesta quando sulle pareti e sul soffitto sono presenti numerosi elementi aggettanti (colonne, statue, cassettoni etc.) mentre essa è carente se le superfici sono dolci, ampiamente curvate ma prive di spigoli che, invece produrrebbero effetti di diffrazione del suono. Una povera diffusione del suono si manifesta anche quando l’area d’orchestra è riverberante mentre il resto della sala è sorda.
 - 9) *Bilanciamento*: Corrisponde al giusto peso relativo delle varie sezioni dell’orchestra, ovvero di orchestra e cantanti o solisti. Il bilanciamento delle sezioni orchestrali dipende dalla forma e dimensione dell’area d’orchestra, dalla presenza di elementi diffondenti sia lateralmente che superiormente all’area d’orchestra, dalle possibilità che il Direttore d’orchestra ha di ascoltare con intensità soggettiva non alterata i suoni provenienti dai diversi strumenti musicali.
 - 10) *Fusione*: Indica la giusta mescolanza dei suoni dei vari strumenti dell’orchestra in modo che sembrino armoniosi all’ascoltatore. Bilanciamento e fusione dipendono dalla forma dell’area destinata all’orchestra e dalla disposizione degli strumentisti.
 - 11) *Assieme (Ensemble)*: corrisponde alla capacità dei musicisti di suonare all’unisono, cioè di iniziare e terminare simultaneamente; questo risultato dipende dalla possibilità dei musicisti di sentirsi l’un l’altro e quindi è funzione dell’intimità, della vivezza, del calore e dell’intensità del suono diretto e di quello riverberato mentre meno importanti risultano la diffusione, il bilanciamento e la fusione.
 - 12) *Immediatezza di risposta (attacco)*: Corrisponde alla sensazione che ha il musicista, il solista o il cantante che la sala risponda immediatamente al suono emesso. La risposta della sala vista dal musicista è legata alla struttura delle prime riflessioni che tornano indietro dalla sala stessa. Se il ritardo rispetto all’istante di emissione risulta eccessivo il musicista avverte l’eco

provenire dalla sala e quindi ha una risposta anomala che condiziona l'attacco delle note successive. Si riduce la carenza di attacco dimensionando ed orientando le superfici riflettenti più vicine all'esecutore.

- 13) *Tessitura*: è l'impressione soggettiva dell'ascoltatore creata dalla conformazione in intensità e tempi di arrivo delle riflessioni successive alla prima. Il succedersi ordinato delle riflessioni con ampiezza degradante produce un effetto sonoro diverso da quello prodotto da una struttura di riflessioni successive con intervalli di durata molto diverse ed ampiezze delle riflessioni temporalmente più lontane dalla prima con ampiezze maggiori.
- 14) *Assenza di eco*: l'eco costituisce una riflessione del suono che si manifesta con un certo ritardo rispetto al suono diretto. Se si supera un determinato valore la riflessione con ampiezza rilevante produce una sensazione sgradevole per chi ascolta la musica. L'eco è accentuata da pareti riflettenti molto distanti (soffitti molto alti etc.) e da curvature inadatte che focalizzano il suono in determinati punti della sala.
- 15) *Assenza di rumore di fondo*: principalmente immesso in sala dagli impianti di condizionamento, dagli impianti di amplificazione del suono, dal traffico esterno, dal vociare nei locali attigui, dal brusio del pubblico.
- 16) *Dinamica*: è la possibilità offerta in sala di udire sia suoni intensi (fortissimo) sia deboli (pianissimo). Si esprime come differenza dei livelli del fortissimo prodotto dall'orchestra e del rumore di fondo.
- 17) *Qualità tonale*: rappresenta la bellezza di un suono musicale. E' legata alla possibilità di poter distinguere il timbro dei diversi strumenti musicali, di poter distinguere la voce umana nella massa sonora dell'orchestra, il suono dello strumento solista nel concerto etc. Le qualità timbriche di una sala sono spesso associate alle sensazioni cromatiche e possono essere alterate dall'acustica se gli assorbimenti non risultano bilanciati in frequenza. La qualità tonale è anche condizionata dalla direttività di alcuni strumenti musicali.
- 18) *Uniformità*: è un concetto legato alla uniforme distribuzione del suono in sala. Ovviamente una buona acustica di una sala è anche sinonimo di buon ascolto in tutti i punti occupati dal pubblico e dall'orchestra. In molte sale si rilevano zone d'ombra o zone morte dove il suono è carente sia di intensità che di chiarezza, pienezza del tono, intimità etc.

I diciotto attributi qualitativi sopra definiti possono essere separati in tre categorie definite dal grado di importanza per il dimensionamento della sala sotto il profilo acustico. Gli attributi tra loro indipendenti e che giocano un ruolo positivo sono: Intimità, Vivezza, Calore, Intensità soggettiva del suono diretto, Intensità soggettiva del suono riverberato, Diffusione, Bilanciamento e fusione, Assieme. Gli attributi tra loro indipendenti ma che giocano un ruolo negativo sono: Eco, Rumore di fondo, Distorsione, non uniforme distribuzione del suono. Gli attributi qualitativi che dipendono dagli altri sono: Chiarezza, Brillanza, Attacco, Tessitura, Gamma dinamica.

Lo studio approfondito del correlato psicofisico della percezione della musica in una sala da concerto ha permesso di individuare alcune condizioni necessarie, ma non sufficienti, per un buon ascolto in auditorium:

- è necessario che all'ascoltatore giunga il suono diretto accompagnato da energia sonora di prima riflessione;
- la distribuzione temporale dell'energia sonora di prima riflessione deve essere relativamente equilibrata in tutto l'auditorium;
- il suono di prima riflessione deve essere diretto in grande quantità lungo direzioni laterali per l'ascoltatore, privilegiando la scarsa somiglianza delle pressioni sonore alle due orecchie;
- il suono diretto e l'energia di prima riflessione devono essere a banda larga;

- è necessaria una riverberazione adeguata alle frequenze medie e la caratteristica in frequenza della riverberazione deve essere costante o a pendenza lievemente negativa.

E' possibile, con il corretto dosaggio degli elementi sopra definiti, realizzare sale che rispondano in maniera ottimale ai diversi stili musicali.

- ◇ *La musica barocca* (Corelli, Vivaldi, Hendel, Bach etc.) fu composta ed eseguita in ambienti relativamente piccoli ad elevato livello di intimità e presenza, e con tempo di riverberazione a sala occupata inferiore a 1,5 s. Risulta quindi un'alta definizione ed una bassa pienezza dei toni. Per la musica sacra del periodo barocco, invece, è richiesta una sala ad elevato tempo di riverberazione come è lo spazio sonoro delle cattedrali.
- ◇ *Per la musica del periodo classico* (Mozart, Haydin, Beethoven etc.) con idee estetiche nettamente diverse dal periodo precedente, prende corpo la sinfonia ed i concerti per orchestra e solisti. La musica viene eseguita in vere sale da concerto che possono ospitare anche mille persone. Il tempo di riverberazione di queste grandi sale si avvicina a 1.8s con buona pienezza dei toni, mentre la chiarezza risulta preservata dalla limitata forma rettangolare della sala.
- ◇ *Per la musica romantica* (Mendelsson, Braahms, Wagner, etc.) si assiste ad un aumento dell'organico d'orchestra con presenza di numerose sezioni musicali (archi, legni, trombe, percussioni etc.) con una ricchezza timbrica rilevante. Le sale da concerto sempre più capienti si caratterizzano con una maggiore pienezza di tono, tempi di riverberazione più elevati (1,9-2,2 s) e piccolo rapporto tra suono diretto e suono riverberato. Questo porta ad una riduzione della chiarezza.
- ◇ *Nel XX secolo* si assiste ad un proliferare di sale da concerto ed auditorium costruiti anche per esigenze della radio prima e della televisione poi. Le caratteristiche acustiche di queste sale rivoluzionano in parte i concetti descritti proprio per la particolare destinazione d'uso che deve adeguarsi a tutti gli stili. La musica prodotta dall'orchestra non è solo diretta a pochi spettatori (da 800 a 2000) ma a milioni di persone che ascoltano dalla radio i concerti dal vivo. Le esigenze acustiche si rivelano molteplici: da un lato occorre realizzare sale adatte a tutti gli stili musicali seguiti dai diversi autori dal '700 in poi, dall'altro emergono sempre più esigenti e diversi i requisiti per una buona ripresa sonora. L'ascoltatore ora è il microfono che, posizionato nello spazio della sala, riprende il suono che deve essere "radiofonicamente" diffuso in tutto il mondo. Inizialmente le esigenze della radio erano limitate ad una trasmissione di tipo monofonico; poi, con il progredire della tecnica e con l'avvento della televisione che sottrae sempre più pubblico alle sale cinematografiche, viene introdotto il sistema di riproduzione stereofonico, subito diventato un cavallo di battaglia del cinema che tenta di resistere agli assalti della televisione. Quest'ultima, nella rincorsa tecnologica, ha introdotto l'audio stereofonico; oggi il cinema ha introdotto una nuova dimensione nello spazio sonoro: il Dolby surround. La radio e la televisione tentano, ancora una volta, di non segnare il passo introducendo anch'esse, nelle trasmissioni sperimentali, questo nuovo concetto di campo sonoro. La tecnica di ripresa diventa una nuova branca dell'acustica e trova, come primo ostacolo, il fenomeno della riverberazione dell'ambiente. Emergono numerose contraddizioni per chi si deve occupare del dimensionamento acustico degli auditorium destinati alla trasmissione radiofonica o alla registrazione dei dischi. Se una buona ripresa sonora può essere effettuata in ambiente poco riverberante (sale sorde) ove il tecnico del suono aggiunge, assistito dal musicista, la riverberazione artificiale mediante tecniche elettroniche, una buona esecuzione dell'orchestra richiede un ambiente vivo, in cui la pienezza dei toni è giustamente calibrata e le esigenze dei musicisti (assieme, immediatezza della risposta, etc.) sono pienamente soddisfatte. Si realizzano auditorium ad acustica variabile in cui l'opportuna rotazione di elementi posti sulle pareti e sul soffitto (assorbenti da un lato e riflettenti dall'altro) realizzano i tempi di riverberazione adatti ai

diversi stili musicali. La selva di microfoni e cavi nell'area d'orchestra e l'utilizzo di banchi di registrazione sempre più sofisticati, consentono al tecnico del suono di variare a piacimento i parametri sopra elencati introducendo correzioni elettroniche in tempo reale durante le riprese dal vivo o in fase di post-produzione per la realizzazione dei programmi in differita o dei dischi. Lo spettatore in una sala di concerto resta sempre colui che usufruisce del piacere di "sentire" dal vivo l'esecuzione dell'opera classica, ma alle sue spalle ha una nutrita schiera di spettatori "casalinghi" che ascoltano la musica attraverso il loro impianto HI FI in un ambiente poco adatto o in cuffia, usufruendo della magia "virtuale" sempre più prodotta dal tecnico elettronico e meno dal vero musicista.

- ◇ Un altro spazio acusticamente "particolare" è quello riservato ai concerti di gruppi rock, singoli cantanti di grido etc. Gli strumenti musicali sono tutti elettronici e quei pochi definiti per assurdo "acustici" sono elettronicamente amplificati e irradiati da intere pareti di diffusori che erogano decine di Watt acustici. Si utilizzano numerosi effetti sintetizzati elettronicamente per rendere il suono adatto alla forza espressiva del gruppo; si utilizzano i cosiddetti diffusori spia rivolti verso il complesso e i cantanti per sopperire alla mancanza di "immediatezza di risposta o attacco" che la sala non può più avere perché la presenza di diverse decine di migliaia di persone impone l'uso di spazi aperti (campi di calcio, arene etc.). L'acustica degli spazi chiusi (palazzetti dello sport, palazzi tenda etc.) richiede specifici requisiti per questo nuovo modo di far musica che allarga di molto il discorso, limitato qui dallo spazio concesso.

I requisiti sopra descritti enfatizzano maggiormente le esigenze di chi ascolta la musica; dal punto di vista di chi esegue la musica, i requisiti dello spazio sonoro sono diversi e devono affrontare anche altri problemi:

- ⇒ difficoltà di sentire il proprio strumento;
- ⇒ difficoltà di sentire gli altri gruppi strumentali nel momento di assieme;
- ⇒ mancanza di "risposta" della sala (come viene definita dai musicisti), non percepita acusticamente come prolungamento ed integrazione del suono.

Le cause di questi problemi possono essere:

- fenomeni di mascheramento di strumenti forti su strumenti deboli (ex. ottoni su legni);
- la collocazione relativa dei vari gruppi strumentali (ad esempio il suono prodotto da un gruppo attraversa una sezione di strumenti e giunge al terzo gruppo strumentale troppo attenuato);
- il campo delle prime riflessioni nell'area del palco, quando esso è tale da rinforzare ulteriormente gli strumenti forti;
- la disposizione dei diversi settori strumentali che li allontana invece di avvicinarli.

Questi problemi possono essere risolti attraverso il controllo delle prime riflessioni provenienti dalle superfici intorno all'area d'orchestra, in modo da rinforzarle o attenuarle a seconda della zona d'orchestra interessata.

A tale proposito è interessante citare gli studi effettuati da Marshall, Gottlob e Alrutz che stabiliscono alcune caratteristiche acustiche per ottenere facilità di assieme in una piccola orchestra d'archi:

- sono considerate favorevoli le riflessioni comprese tra 17 e 35 ms. Se giungono in tempi maggiori esse hanno influenza negativa;
- lo spettro utile delle riflessioni è compreso tra 0,5 e 2 kHz. L'energia riflessa al di sotto dei 0,5 kHz influisce negativamente;

- l'equilibrio tra tutte le sezioni strumentali dell'orchestra è raggiunto quando la somma dei livelli provenienti dalle diverse sezioni strumentali e percepite da un singolo professore d'orchestra non supera i ± 3 dB.

Altri studi interessanti sono stati condotti da Ando sull'individuazione del campo sonoro preferito dagli esecutori. I soggetti presi in esame sono strumentisti e le loro preferenze possono essere sintetizzate come segue:

- il ritardo preferito da uno strumentista (ex. flauto dolce) dipende dalla durata della funzione di autocorrelazione del pezzo musicale;
- il musicista preferisce un campo sonoro in cui i segnali che giungono alle orecchie sono simili;

Secondo gli studi di Marshall e Meyer, invece, effettuati sia su cantanti solisti che in coro, una buona percezione del solista dipende dalla riverberazione percepita sul palcoscenico:

- cantante solista o strumentista solista: le riflessioni iniziali, se intense, contribuiscono favorevolmente solo se il loro ritardo è minore di 40 ms;
- strumentisti d'insieme: le riflessioni iniziali intense sono molto importanti.

2.2 TEATRI D'OPERA

I requisiti per i teatri d'opera sono più numerosi di quelli precedentemente elencati in quanto ad essi si aggiungono le esigenze dei cantanti sul palco e dell'orchestra nella fossa d'orchestra. La disposizione spaziale di queste due sorgenti sonore che musicalmente sono strettamente legate e spazialmente sono fortemente divise, crea non pochi problemi per l'ascolto reciproco e quindi per le condizioni di assieme. L'area destinata al pubblico, poi, assume il ruolo di un terzo spazio che non deve assolutamente essere scollegato con i due precedentemente descritti. Si devono stabilire quindi equilibri tra i cantanti sul palco, i musicisti nella fossa d'orchestra, il direttore d'orchestra e il pubblico. I cantanti devono sentire prontamente gli attacchi dell'orchestra per poter cantare "a tempo". I professori d'orchestra devono poter sentire i cantanti sul palco per poter bilanciare la potenza di emissione dei propri strumenti in modo da non sovrastare la voce dei cantanti. Il direttore d'orchestra, responsabile di questo equilibrio, deve poter ascoltare correttamente i suoni che provengono dalle due sorgenti distinte per poter realizzare i bilanciamenti necessari anche per un buon ascolto in sala.

Lo spettatore deve poter udire con il giusto equilibrio dei livelli sia la voce dei cantanti che la musica dell'orchestra, deve avere la sensazione di essere avvolto nel suono ed essere coinvolto emotivamente nello spettacolo, deve poter capire il "libretto" comprendendone le parole.

La migliore forma della sala per rispondere ai requisiti precedentemente elencati è quella del teatro d'opera italiano. La forma a ferro di cavallo della sala e la realizzazione di numerosi ordini di palchi, consente al pubblico di avvicinarsi maggiormente alla scena e quindi di percepire meglio la voce dei cantanti, grazie alla maggiore intensità del suono diretto rispetto a quello riverberato. Sale di questo tipo costruite in Italia, in Europa e negli altri continenti, presentano una capienza limitata ad un massimo di 4000 posti. Esigenze legate alla economicità dello spettacolo, consentono un buon ammortamento delle scene se si superano i 2500 biglietti venduti per spettacolo; la macchina teatrale infatti richiede un organico di persone che normalmente supera le 800 unità, tra coro, orchestra stabile, macchinisti, elettricisti etc. Questa necessità economica spinge le amministrazioni alla realizzazione di teatri sempre più capaci e

questo è possibile solo se si sostituiscono gli ordini di palchi con ampie gallerie. Lo spettatore si allontana per questo dalla sorgente e inevitabilmente risulta compromessa la qualità dell'ascolto.

2.3 TEATRO DI PROSA

L'individuazione dei requisiti progettuali per un teatro di prosa può essere tratta dallo studio dei primi e più famosi teatri di origine greca e romana. E' ben noto quali siano state le massime espressioni dell'acustica per teatri di questo tipo e quali insegnamenti si possano trarre analizzando criticamente i pochi resti archeologici a noi pervenuti. La scena ove gli attori rappresentavano la tragedia, il dramma etc. (teatro greco) è costituita da un palco con pavimento presumibilmente in legno dietro il quale si eleva una costruzione in pietra che costituisce una scena fissa. L'attore si muove sul palco e, specialmente nella tragedia greca, è accompagnato dal coro che si trova nel semiciclo piano ai piedi del palco, denominato proprio *coro*; la platea è ad anfiteatro ed è in grado di ospitare più di 5000 persone; la ripida pendenza della cavea in alcuni teatri (Epidauro, Aspendos etc.) consente allo spettatore una buona visione ed un ottimo ascolto della rappresentazione. Numerosi sono gli aneddoti che si tramandano, quali l'uso di apposite maschere con bocca a forma di megafono indossate dagli attori anche per amplificare la voce, la posizione in prossimità di pareti altamente riflettenti in cui gli stessi attori si collocavano quando volevano dare più potenza e colore alla propria voce in particolari passaggi della recitazione, la presenza di particolari cavità risonanti (vasi di Vitruvio) per dare più potenza al suono, presumibilmente aumentando il tempo di riverberazione. Alcuni ritengono che i teatri romani fossero dotati di coperture a tenda per proteggere gli spettatori dalla pioggia o dal sole. La presenza dell'area semicircolare o circolare del coro realizzata in pietra è un ottimo specchio riflettente della voce verso gli spettatori più lontani; nel teatro greco e romano, infatti, l'acustica non può contare sulla riflessione del soffitto perché inesistente. Se di necessità occorre fare virtù, i romani e i greci avevano intuito le prime regole dell'acustica e le avevano sfruttate appieno non potendo ricorrere a mezzi di amplificazione elettronica.

Da questa sommaria analisi possiamo riconoscere i requisiti fondamentali per una sala di teatro di prosa, ancor più seguendo l'evoluzione nel tempo dell'architettura di questo tipo di teatro. L'anello di congiunzione che lega il teatro greco e romano al teatro di prosa moderno è il teatro Olimpico di Vicenza, massima espressione architettonica della fine del '500. E' ben nota l'architettura interna del teatro, progettato da Palladio e arricchita dalla scenografia fissa dello Scamozzi. La sala è a forma di anfiteatro, mantiene ancora un'area libera dal pubblico sotto il palco ed ha una platea a sezione molto ripida. Le caratteristiche architettoniche suggeriscono una sala molto vivace sotto il profilo acustico, con tempo di riverberazione non eccessivamente basso e, soprattutto, con una forte intensità del suono diretto, legata proprio alla ridotta distanza tra spettatore e scena. In sintesi possiamo concludere che i requisiti da ricercare per la progettazione di una sala di prosa sono tutti legati ad una ottima intelligibilità del parlato e a condizioni tali da evitare all'attore di sforzare il proprio organo vocale. Per questo è importante che:

- si mantengano distanze ridotte tra ascoltatori e scena;
- il tempo iniziale di ritardo sia contenuto entro 20 ms perché le prime riflessioni rinforzino il suono diretto;
- ci sia una buona distribuzione del livello sonoro in sala per tutte le posizioni che l'attore può assumere sulla scena;
- si introducano poche superfici fonoassorbenti che sottraggono energia sonora al campo acustico;
- si ricerchi una buona intensità del campo diretto per evitare le negative implicazioni del campo riverberato;

- il rumore di fondo e il brusio in sala siano mantenuti bassi per ottenere un buon rapporto segnale-rumore che giova all'intelligibilità.

Ovviamente questi requisiti devono essere soddisfatti con le regole di acustica ambientale, senza ricorrere all'amplificazione elettroacustica.

2.4 SALE PER CONFERENZA

Numerose sono le sale dedicate ai convegni ove protagonista è la voce ed oggi anche la presentazione multimediale dell'idea dell'oratore. Queste sale devono consentire una buona intelligibilità della parola, intesa come corretta comprensione del messaggio. L'intelligibilità normalmente viene espressa e verificata in base al numero di logatomi (sillabe prive di senso compiuto) corretti interpretati da un pubblico di ascoltatori rispetto al numero totale dei logatomi pronunciati. Un altro aspetto fondamentale che deve essere tenuto presente per le sale da conferenza è l'amplificazione elettroacustica della voce, necessaria per evitare lo sforzo vocale dell'oratore. L'interazione fra impianto elettroacustico e acustica della sala può creare particolari fenomeni che non solo riducono l'intelligibilità del parlato, ma infastidiscono notevolmente l'oratore. Possiamo quindi elencare i requisiti acustici di una sala per conferenze:

- buona integrazione dell'acustica con un impianto di amplificazione;
- mancanza di inneschi sonori tra microfono e altoparlante;
- assenza di particolari coloriture della voce;
- impressione di spazialità e di direzionalità del suono (l'uditore deve poter avere informazioni sulla direzione di provenienza della voce in modo da individuare immediatamente, ad esempio un parlatore in una tavola rotonda).

Questi requisiti si conseguono in sale con basso tempo di riverberazione, elevato rapporto tra suono diretto (emesso dall'altoparlante) e suono riverberato, ridotta differenza di ritardo tra suono riprodotto dall'altoparlante e voce dell'oratore, assenza di rumore di fondo.

3. LE PRESTAZIONI ACUSTICHE DELLE SALE

Dall'interazione tra il campo sonoro (realtà fisica) e la sfera della percezione ed elaborazione del cervello (psiche) è possibile definire una serie di criteri oggettivi che possono essere quantificati attraverso dei parametri, in grado di considerare anche la percezione ed il giudizio soggettivo.

Per definire la sensazione soggettiva di percezione del suono, espressa inizialmente come giudizio personale elaborato dal cervello sulla base dei meccanismi prima descritti, sono stati condotti degli studi mirati ad individuare le relazioni esistenti tra le variazioni della struttura fisica del campo sonoro in cui si trova l'ascoltatore (acustica) e la variazione del giudizio personale (psico-acustica).

3.1 ALCUNE ESPERIENZE FONDAMENTALI

Dopo le prime esperienze di Sabine, occorre giungere fino ai primi anni '50 per avere uno studio organico sulle qualità acustiche di una sala da concerti, sugli indirizzi progettuali e sulle verifiche prestazionali. Il lavoro di Beranek, riportato nel suo libro "*Music, Acoustics and Architecture*", oltre alla definizione degli attributi qualitativi di una sala, tenta un criterio di valutazione delle prestazioni delle sale mediante l'introduzione di un punteggio dedotto dalla quantificazione dei numerosi elementi che descrivono l'acustica. Il lavoro si basa sullo studio di 54 sale da concerto e teatri d'opera e sull'intervista a 50 direttori d'orchestra e critici musicali. Le sale indagate vengono suddivise nelle seguenti 5 classi:

A+ eccellente

A da molto buona ad eccellente

B+ da buona a molto buona

B da sufficiente a buona

C+ sufficiente.

I criteri soggettivi di valutazione sono correlati alle seguenti grandezze misurabili:

- **Tempo Iniziale di Ritardo (Initial Time Delay Gap)**

E' il valore temporale del ritardo della prima riflessione rilevante ricevuta nel punto di ascolto dopo l'istante iniziale in cui arriva il suono diretto. Questo parametro è legato al criterio soggettivo che definisce l'impressione delle dimensioni della sala, denominato intimacy.

I valori trovati sono i seguenti:

- classe A+ <20 ms

- classe A <33 ms

- classe B <57 ms

- classe C+ <70 ms

- **Tempo di riverberazione alle frequenze medie:**

E' un parametro correlato al criterio soggettivo che definisce la vivezza del suono (liveness) e la pienezza del tono (fullness of tone) e viene calcolato mediante la seguente relazione:

$$T_{med} = \frac{T_{60(500Hz)ott} + T_{60(1000Hz)ott}}{2} \quad [s]$$

dove: $T_{60(500Hz)ott}$ = tempo di riverberazione nella banda di ottava a 500 Hz;

$T_{60(1000Hz)ott}$ = tempo di riverberazione nella banda di ottava a 1000 Hz;

Il tempo di riverberazione alle medie frequenze è definito come la media aritmetica del tempo di riverberazione convenzionale di Sabine, o T60, tra la banda di ottava a 500 Hz e la banda di ottava a 1000 Hz.

Beranek propone dei valori ottimali, che variano in funzione del tipo di sala analizzata. Egli assegna il massimo punteggio (15 punti) alle sale che rientrano nei campi di riferimento. I

valori ottimali previsti dal Beranek sono indicati nella **Tab.III** più oltre riportata, in cui è indicata anche la relazione sopra descritta.

- **Bass Ratio** o *rapporto dei bassi*

È un parametro correlato al criterio soggettivo che definisce il calore del suono (warmth), cioè la vivezza ed la pienezza delle note gravi, e viene calcolato mediante la seguente relazione:

$$BassRatio = \frac{T_{60(125Hz)ott} + T_{60(250Hz)ott}}{T_{60(500Hz)ott} + T_{60(1000Hz)ott}} = \frac{T_{60(125Hz)ott} + T_{60(250Hz)ott}}{2T_{med}} \quad [s]$$

dove: $T_{60(125Hz)ott}$ = tempo di riverberazione nella banda di ottava a 125 Hz;

$T_{60(250Hz)ott}$ = tempo di riverberazione nella banda di ottava a 250 Hz;

$T_{60(500Hz)ott}$ = tempo di riverberazione nella banda di ottava a 500 Hz;

$T_{60(1000Hz)ott}$ = tempo di riverberazione nella banda di ottava a 1000 Hz;

Il Bass Ratio è definito come il rapporto della media aritmetica del tempo di riverberazione convenzionale di Sabine, o T60, tra la banda di ottava a 125 Hz e la banda di ottava a 250 Hz ed il tempo di riverberazione alle medie frequenze. Come per il Tmed, Beranek propone dei valori ottimali che variano in funzione del tipo di sala analizzata. Egli assegna il massimo punteggio (15 punti) alle sale che rientrano nei campi di riferimento riportati nella **Tab.III**.

Una nuova svolta nello studio dell'acustica delle sale si è avuta con l'individuazione dell'importanza delle *prime riflessioni laterali*, cioè quelle riflessioni che arrivano all'orecchio pochissimo tempo dopo il suono diretto.

I primi studi in questa direzione vengono condotti da Haas circa 30 anni fa. Il ricercatore dimostra che le prime riflessioni percepite dal nostro orecchio dopo l'arrivo del suono diretto non vengono distinte ma integrano l'intensità soggettiva del suono diretto se il ritardo si mantiene entro precisi limiti (ritardo inferiore a 20 ms).

Lochner e Burger, applicando queste scoperte ai loro studi sulle necessità del *parlato*, dividono le riflessioni in due gruppi:

1. le *prime riflessioni* che contribuiscono a migliorare l'intelligibilità del parlato;
2. le *successive riflessioni* che peggiorano l'intelligibilità.

Tali conclusioni sono il risultato di esperimenti condotti dai due studiosi, i quali verificano che aumentando l'energia delle prime riflessioni si aumenta l'intelligibilità, mentre aumentando l'energia delle successive riflessioni accade il contrario. In base a tali risultati viene definito un *rapporto tra prime riflessioni e successive riflessioni*: è un rapporto in cui al numeratore vi è la somma delle energie del suono diretto e delle prime riflessioni, mentre al denominatore vi è la somma di tutte le riflessioni successive. Maggiori sono i valori raggiunti da questo rapporto, migliori sono le condizioni di intelligibilità. Definito un rapporto in grado di quantificare l'energia di queste riflessioni, ci si pone il problema di individuare una divisione netta tra prime riflessioni e le successive riflessioni. Per il *parlato* Thiele e Schultz

sperimentano e propongono un intervallo compreso tra 0 e 50 ms, mentre Reichardt e i suoi collaboratori, che si occupano di acustica nelle sale adibite all'ascolto della musica, definiscono un intervallo compreso tra 0 e 80 ms. Studiosi come Cremer e Kurer, criticando la scelta di un metodo di analisi che impone una separazione netta tra prime riflessioni e successive riflessioni, cercano di superare il problema proponendo un parametro che determina il baricentro del segnale di risposta analizzato, cioè il centro di gravità di una risposta sonora, detto anche *tempo centrale*.

Mentre gli studiosi prima citati si impegnano nel tentativo di comprendere e quantificare l'influenza delle prime riflessioni sulla intelligibilità di un suono percepito dall'orecchio dell'uomo, altre ricerche vengono condotte sulle relazioni tra prime riflessioni e tempo di riverberazione. Schroeder dimostra che la riverberazione percepita soggettivamente è più strettamente correlata alla prima parte del decadimento piuttosto che all'intero decadimento di 60 dB. Egli determina il *tempo di decadimento iniziale* (*EDT= Early Decay Time*) basato sui primi 10 dB di decadimento. A questo parametro seguono altri criteri, stabiliti per consentire l'analisi di ambienti e situazioni molto diversi tra loro, nei quali però le prime riflessioni condizionano pesantemente il giudizio sull'acustica.

Per l'esecuzione della musica risultano importanti anche le *prime riflessioni laterali*, cioè le prime riflessioni che arrivano all'ascoltatore dalle pareti laterali della sala. In realtà l'orecchio non percepisce la direzione di provenienza di ciascuna riflessione, nella moltitudine che giunge all'ascoltatore, ma elabora una particolare sensazione che prende il nome di "impressione spaziale", cioè l'impressione soggettiva di sentirsi immersi nella musica. Barron e Marshall sono tra coloro che più si sono impegnati in questa direzione. In particolare gli studi di Barron hanno permesso di mettere in relazione l'impressione spaziale con l'energia contenuta nelle prime riflessioni laterali.

L'analisi dell'acustica di una sala impone ancora alcune verifiche, molto più semplici di quelle sopra descritte ma decisamente fondamentali. Innanzitutto è necessario valutare il *livello del rumore di fondo*, il quale può pregiudicare le qualità di ascolto di una presentazione musicale. In secondo luogo deve essere analizzato il *livello del suono*, in modo che in tutti i punti della sala sia garantita una buona percezione della sorgente. Wilkens e Lehman sono due studiosi che si sono impegnati proprio in questa direzione.

Ad integrazione dei concetti precedentemente esposti, a partire dagli anni '70 sono state applicate e sviluppate nuove tecniche psicometriche: il concetto di base è quello di scoprire i fattori, indipendenti l'uno dall'altro, che determinano il giudizio soggettivo di una buona acustica e di definire i parametri fisici che sono più strettamente correlati a tali giudizi. Tra tutte le indagini svolte sino ad ora le più importanti sono quelle svolte dai gruppi di Berlino (Wilkens ed altri) e di Gottinga (Schroeder ed altri).

- Il gruppo di Berlino evidenzia tre parametri soggettivi fondamentali:
 - F1: intensità ed estensione della sorgente sonora;
 - F2: percezione della chiarezza del suono complessivo;
 - F3: giudizio sul suono complessivo in relazione al timbro.

Questi parametri risultano ben correlati con delle grandezze oggettive che verranno definite più oltre.

- F1 (l'intensità e l'estensione della sorgente) è correlato al parametro G (capitolo 3.2.3) che per una buona intensità ed estensione della sorgente sonora deve essere ≥ -28 dB;

- F2 è ben correlato con l'istante baricentrico dell'energia di Cremer e Kurer, o t_s . (**Tab.I**). Per ottenere una buona percezione della chiarezza occorre che $t_s \leq 140$ ms;
- F3 è correlato con il parametro EDT (Tempo di primo decadimento nelle bande di ottava tra 125 e 2000 Hz) (capitolo 3.2.2). Perché il timbro del suono risulti equilibrato è necessario che l'andamento del Tempo di primo decadimento abbia una pendenza lievemente negativa o nulla.

- Il gruppo di Gottinga evidenzia quattro fattori soggettivi. Il più importante di questi è D1 o "fattore di consenso" (correlato al IRT o Tempo di riverberazione iniziale) e D o Indice di Definizione. Questi due parametri oggettivi sono a loro volta correlati tra di loro. D1 è anche correlato con la larghezza della sala e con la coerenza interna.

Tutte queste correlazioni tra fattori soggettivi e parametri oggettivi confermano l'influenza positiva delle prime riflessioni laterali. Inoltre dall'indagine del gruppo di Gottinga scaturisce la conclusione secondo la quale sono preferibili sale strette ed alte. In questo caso, infatti, le pareti laterali producono prime riflessioni laterali equilibrate rispetto al suono diretto. In pratica è importante che vi sia una bassa coerenza interna, cioè una certa differenza tra i segnali che giungono alle due orecchie.

3.2 LE FAMIGLIE DI PARAMETRI

Come si è visto, la scoperta dell'importanza delle prime riflessioni ha generato ambiti precisi di studio in cui sono state approfondite le relazioni esistenti tra le prime riflessioni e alcuni aspetti importanti nella determinazione qualitativa dell'ascolto della musica. Si è anche evidenziato che la ricerca si è sviluppata essenzialmente in quattro direzioni diverse originando criteri oggettivi in grado di spiegare e quantificare i fenomeni analizzati. Si cercherà ora di definire in modo più preciso i quattro ordini di problemi:

1. prime riflessioni ed intelligibilità;
2. prime riflessioni e riverberazione;
3. prime riflessioni laterali e spazialità;
4. livello e trasmissione del suono.

3.2.1 Prime riflessioni ed intelligibilità

E' già stata sottolineata l'importanza del tracciato dell'andamento temporale della pressione sonora ($p(t)$) in un punto della sala eccitata con un segnale impulsivo. La rappresentazione grafica di tale segnale è detta ecogramma della pressione sonora. Questo mostra in successione le riflessioni che giungono nel punto di osservazione.

Secondo Cremer non è importante considerare i dettagli della risposta all'impulso oltre il tempo $t_{st} = 2\sqrt{V}$ ms (dove V è il volume della sala), perché l'orecchio integra tutta la parte precedente del segnale. Infatti, le differenze qualitative di ascolto tra un punto e l'altro all'interno di una sala sono determinate essenzialmente dalla prima parte del segnale, caratterizzata da riflessioni intense ed isolate. I parametri che definiscono la nitidezza di una sala, detti anche criteri della frazione energetica, sono fondati sull'ipotesi che la percezione soggettiva di un suono sia dovuta alla parte iniziale di energia considerata utile e che la rimanente parte contribuisca negativamente o sia indifferente.

I problemi riguardanti la nitidezza del suono percepito riguardano sia l'ascoltatore che il musicista. E', quindi, necessario, distinguere i parametri nel seguente modo:

- famiglia di parametri per la misura della nitidezza per l'ascoltatore;

- famiglia di parametri per la misura della nitidezza per il musicista.

Nitidezza per l'ascoltatore

I parametri più importanti che consentono di definire il grado di nitidezza del segnale percepito dall'ascoltatore sono i seguenti:

- **D o Definizione**

È un parametro introdotto da Thiele:

$$D = \left(\frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \right) \quad [\%]$$

In questa espressione $p(t)$ è la pressione sonora, intesa come risposta all'impulso emesso da una sorgente non direttiva, e $t=0$ è l'istante in cui il suono diretto giunge nel punto di osservazione. L'indice di definizione è definito come il rapporto tra l'energia che giunge all'ascoltatore entro i primi 50 ms e l'energia di tutto il segnale.

Questo parametro ha origine dagli studi di Haas sui legami tra percettibilità, disturbo, livello e ritardo di una riflessione successiva all'onda diretta. I risultati di questi esperimenti confermano che l'energia delle prime riflessioni, sommandosi a quella del suono diretto, contribuisce positivamente alla nitidezza del parlato. I valori di riferimento proposti dalla letteratura per questo parametro sono riportati nella **Tab.I**.

- **R o Massa della Sala**

È un parametro proposto da Beranek e Schultz ed è calcolato mediante la seguente espressione:

$$R = 10 \log \left(\frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{50ms} p^2(t) dt} \right) = 10 \log \left(\frac{1 - D}{D} \right) = -C_{50} \quad [\text{dB}]$$

Tale espressione rappresenta il rapporto tra l'energia che giunge all'ascoltatore da 50 ms alla fine del decadimento del segnale e l'energia dei primi 50 ms. È, quindi, un rapporto tra energia riverberata ed energia diretta. Secondo Schultz questo parametro rappresenta una misura fisica dell'equilibrio tra il mescolamento desiderato dei suoni dei vari strumenti dell'orchestra (blend) e la chiarezza (definition, clarity), attributi soggettivi descritti da Beranek. Il campo di riferimento per questo parametro non è reperibile in letteratura.

- **C o Chiarezza a 80 ms**

La chiarezza è un parametro proposto da Reichart e dal gruppo di Dresda, ed è definito dalla seguente espressione:

$$C_{80} = 10 \log \left(\frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \quad [\text{dB}]$$

Tale espressione rappresenta il rapporto tra l'energia che giunge all'orecchio entro i primi 80 ms e l'energia che perviene negli istanti successivi, ovvero è un rapporto tra energia diretta unita all'energia delle prime riflessioni ed energia delle successive riflessioni. Reichart, Abdel, Alim e Schmidt, utilizzando campi sonori musicali sintetizzati in camera anecoica, hanno sviluppato una scala psicofisica per la trasparenza della musica, che può essere intesa come nitidezza del segnale percepito. Proponendo ad un campione di persone dei brani di musica classica con determinate caratteristiche, si voleva determinare il grado di trasparenza degli stessi brani riproposti più volte agli stessi soggetti con l'unica variazione rappresentata da un ritardo diverso per le riflessioni iniziali. I brani utilizzati sono:

- le prime 36 battute del finale della sinfonia Jupiter di Mozart: sono caratterizzate da passaggi musicali relativamente veloci quindi sono stati presi a misura della trasparenza temporale, ovvero orizzontale; questa trasparenza si riferisce alla percezione nitida di note suonate in successione rapida (orizzontalmente sul pentagramma);
- le battute 380 e 410 dello stesso movimento: hanno un accentuato carattere polifonico e per questo sono state utilizzate per caratterizzare la trasparenza armonica ovvero verticale; questa trasparenza definisce la possibilità di distinguere chiaramente note di uno o più strumenti suonate contemporaneamente (verticalmente sul pentagramma).

Al termine di questa analisi gli studiosi del gruppo di Dresda hanno rilevato che la trasparenza è ben correlata all'indice di chiarezza C prima definito. Per definire la chiarezza di un brano musicale è stato utilizzato il limite di 80 ms in quanto generalmente la musica richiede un tempo di integrazione per l'orecchio maggiore di quello richiesto dal parlato. Inoltre la durata dei transitori della maggior parte degli strumenti musicali è inferiore a 100 ms. I valori di riferimento proposti dalla letteratura per questo parametro sono riportati nella **Tab.I**.

- ***C o Chiarezza a 50 ms***

La chiarezza a 50 ms è definita dalla seguente espressione:

$$C_{50} = 10 \log \left(\frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{50ms}^{\infty} p^2(t) dt} \right) = -R \quad [\text{dB}]$$

Tale espressione rappresenta il rapporto tra l'energia dei primi 50 ms e l'energia che giunge all'ascoltatore da 50 ms alla fine del decadimento del segnale. Tale parametro è l'inverso dell'indice massa della sala. Il campo di riferimento per questo parametro non è reperibile in letteratura.

- *ts o Istante Baricentrico dell'energia o Tempo centrale*

E' un parametro introdotto da Cremer e Kurer. L'espressione rappresenta il rapporto tra l'energia dell'intero decadimento pesata rispetto al tempo, e l'energia complessiva. Le indagini svolte da Kurer dimostrano che questo parametro è molto sensibile alla posizione dell'ascoltatore in una sala e che è ben correlato all'intelligibilità percentuale delle sillabe. L'espressione analitica è la seguente:

$$t_s = \left(\frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \right) \quad [s]$$

Il tempo centrale è ben correlato alla chiarezza musicale nelle sale da concerto. I valori di riferimento proposti dalla letteratura per questo parametro sono riportati nella **Tab.I**.

Tabella I

Definizione e campi di variazione dei parametri legati alla nitidezza dell'ascoltatore

Nome	Espressione analitica	Valori di riferimento	Unità
Chiarezza a 80 ms (Clarity); REICHARDT	$C_{80} = 10 \log \left(\frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt} \right)$	parlato: ≥ 3 musica: $-4 \leq C_{80} \leq 2$	dB
Chiarezza a 50 ms	$C_{50} = 10 \log \left(\frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{50ms}^{\infty} p^2(t) dt} \right)$		dB
Definizione (Deutlichkeit); THIELE	$D = \left(\frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \right)$	parlato: $50 \leq D \leq 100$ musica: < 50	%

Tempo del punto di gravità o Istante baricentrico dell'energia o Tempo centrale (Schwerpunktzeit); CREMER e KURER	$t_s = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$	parlato: $0 \leq t_s \leq 50$ musica: $50 \leq t_s \leq 250$	ms
Massa della sala o Indice R; BERANEK SCHULTZ	$R = 10 \log \left(\frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\frac{50ms}{50ms} \int_0^{\infty} p^2(t) dt} \right)$ $= 10 \log \left(\frac{1-D}{D} \right) = -C_{50}$		dB

Nitidezza per il musicista

I parametri più importanti che consentono di definire il grado di nitidezza del segnale percepito dal musicista sono i seguenti:

- **EEB o Early Energy Balance o Equilibrio dell'Energia Iniziale**

E' un parametro proposto da Jordan. Secondo le conclusioni dedotte dai suoi esperimenti l'elemento più importante nella percezione di un segnale è la quantità di energia diffusa che segue il suono diretto entro un breve intervallo di tempo. Non risulta quindi utile l'analisi delle singole riflessioni considerate in termini di direzione e di ritardo.

L'intervallo utile dovrebbe essere tra 0 e 35 ms. In base a quest'idea Jordan definisce il criterio dell'Equilibrio dell'Energia Iniziale, espressa mediante la seguente relazione:

$$EEB = 10 \log \left(\frac{\int_0^{35ms} p^2(t) dt}{\int_0^{5ms} p^2(t) dt} \right) \quad [\text{dB}]$$

Tale espressione definisce il rapporto tra l'energia che giunge all'ascoltatore entro i primi 35 ms, tempo di arrivo delle riflessioni utili, e il suono diretto che giunge entro i primi 5 ms. Il valore è misurato emettendo un segnale impulsivo sul palcoscenico e riprendendolo con un microfono omnidirezionale, distanziato dalla sorgente in modo da superare la distanza critica della sala. Con *distanza critica* della sala Jordan intende la distanza del "raggio della sala", definito dalla seguente espressione:

$$r_H = \sqrt{\frac{A}{50}} \quad [\text{m}]$$

dove A = unità assorbenti.

Jordan non definisce un campo di riferimento dei valori, ma afferma che nelle sale da lui misurate l'EEB varia tra 2.6 e 11.7 dB, con un valore medio di 6.2 dB. Inoltre afferma che sono preferibili valori alti di EEB, che indicano una grande quantità di energia nei primi 35 ms rispetto al suono diretto. I valori di riferimento del parametro e la formula che lo definisce sono riportati nella **Tab.II**.

- ***St o Supporto o supporto***

Il supporto è espresso dalla seguente relazione:

$$St = 10 \log \left(\frac{\int_{10ms}^{100ms} p^2(t) dt}{\int_0^{10ms} p^2(t) dt} \right) \quad [\text{dB}]$$

La relazione esprime il rapporto tra l'energia dell'onda diretta che giunge al musicista nei primi 10 ms e l'energia delle riflessioni comprese tra 10 ms e 100 ms. Il supporto quantifica quanto le prime riflessioni del palcoscenico aiutino il musicista nella sua prestazione, ovvero quantifica la facilità per un orchestrale di percepire il proprio strumento in relazione agli altri strumenti dell'orchestra. Il campo di frequenze, definito come larghezza di banda dell'insieme e suggerito da Marshall, è dato dall'intervallo di ottave compreso tra 500 Hz e 2000 Hz.

Gade, nell'ambito di una sperimentazione condotta su tre sale, suggerisce come valori ottimali di supporto i valori ricavati dalle misure effettuate nella sala concerti di Tivoli ed espressi come segue:

minimo:	St	=	-7.50	dB
massimo:	St	=	-11.00	dB
medio:	St	=	-9.25	dB

I valori sono stati ottenuti considerando l'intervallo per bande di ottava compreso tra 500 Hz e 2000 Hz. Il supporto risulta ben correlato alle generali preferenze dei musicisti.

Tabella II
Definizione e campi di variazione dei parametri legati alla nitidezza del musicista

Nome	Espressione analitica	Valori di riferimento	Unità
------	-----------------------	-----------------------	-------

Equilibrio dell'energia iniziale (Early energy balance); Jordan	$EEB = 10 \log \frac{\int_0^{35ms} p^2(t) dt}{\int_0^{5ms} p^2(t) dt}$			dB
Supporto (Support)				dB

3.2.2 Prime riflessioni e riverberazione

In questo ambito sono molto interessanti gli studi compiuti da Atal, Schroeder e Sessler. Questi ricercatori hanno condotto degli esperimenti per individuare quale parte del decadimento sia più significativa nel meccanismo della percezione, concludendo che la parte di decadimento responsabile degli effetti percettivi della riverberazione è quella iniziale. Generalmente, infatti, viene distinta solo la prima parte del decadimento, mentre la parte conclusiva è mascherata dagli eventi seguenti. Il suono successivo, infatti, viene emesso prima che il suono precedente sia completamente estinto; di conseguenza la prima parte del decadimento del secondo suono si sovrappone alla parte finale del transitorio di estinzione del primo suono. Sono stati proposti tempi ottimali in funzione del volume e della destinazione d'uso della sala. E' interessante notare le differenze tra il tempo di riverberazione per la parola e quello per la musica:

- parola: l'ascoltatore è interessato a percepire ogni fenomeno con la massima chiarezza, cioè non mascherato dalla coda sonora dei precedenti suoni;

- musica: la riverberazione ha effetti positivi sul mescolamento dei suoni, sulla loro intensità, sulla ricchezza e sull'unione delle note, qualità assenti nell'ascolto all'aperto; la musica richiede tempi di riverberazione più lunghi anche per motivi culturali e per l'abitudine all'ascolto in determinati luoghi.

Per le sale da concerto i tempi di riverberazione ottimali sono stati dedotti da elaborazioni empiriche di opinioni personali e di reputazioni di sale esistenti: i valori variano da 1,4 s a 2,1 s circa (i valori più alti per le sale più grandi). Più specificatamente, nelle sale adibite all'ascolto della musica il tempo di riverberazione ottimale dipende dal tipo di musica eseguita:

- musica da camera: tra 1,4 e 1,6 s;
- musica sinfonica: circa 2 s;
- musica per coro e orchestra e musica per organo: >2 s.

Gli studi effettuati sull'argomento hanno evidenziato la dipendenza del tempo di riverberazione ottimale dallo stile musicale. Particolarmente interessante al riguardo è il lavoro di Ando. Egli ha utilizzato la simulazione elettroacustica computerizzata per riprodurre diverse condizioni di ascolto in camera anecoica. Ha poi sottoposto all'ascolto delle diverse situazioni ottenute un certo numero di persone. L'elaborazione ha evidenziato una chiara dipendenza del tempo di riverberazione ottimale dal tipo di musica ascoltata ed ha confermato che la musica più lenta e meno articolata richiede tempi di riverberazione più lunghi. Un altro elemento fondamentale emerso da questo studio è che il tempo di riverberazione preferito dai soggetti è legato ad una funzione di autocorrelazione del segnale musicale ponderato secondo la curva A.

Per *funzione di autocorrelazione* si intende la misura della "somiglianza" di un segnale con il segnale stesso ritardato di un certo tempo t , al variare del ritardo t . La riverberazione di questo nuovo segnale è costituita da una sequenza di riflessioni che conservano una certa somiglianza con il suono diretto. Ando conclude che più lunga risulta la riverberazione interna al pezzo musicale, misurata attraverso il grado di autocorrelazione del brano musicale stesso, maggiore deve essere la riverberazione della sala per ottenere un buon ascolto.

I parametri o criteri di decadimento più usati sono:

- **T60: tempo di riverberazione convenzionale**

E' una grandezza introdotta da Sabine ed è legato alle proprietà fisiche globali della sala. Il tempo di riverberazione è definito dalla seguente espressione:

$$T_{60} = \frac{0.16 \cdot V}{A} \quad [s]$$

dove V = volume della sala (mc)

A = unità assorbenti (mq)

La relazione esprime il tempo in secondi richiesto per ottenere un decadimento di 60 dB di un suono interrotto bruscamente. In realtà questo parametro viene calcolato con il metodo della retta di regressione lineare. Generalmente si considera la parte della curva di decadimento compresa tra -5 e -30 dB a partire dal valore massimo a 0 dB. E' importante escludere i primi 5 dB di decadimento dalla misura del tempo di riverberazione per evitare l'influenza di prime riflessioni particolarmente forti. I valori di riferimento forniti dalla letteratura sono riportati nella **Tab.III**.

- ***T10 o EDT o Tempo di Primo Decadimento o Early Decay Time***

E' un parametro introdotto da Jordan e rappresenta la misura della prima parte del processo di riverberazione. Esso è definito come il tempo richiesto per ottenere un decadimento di 10 dB di un suono interrotto bruscamente o di un segnale impulsivo. E' calcolato con il metodo della retta di regressione lineare. Il tempo di primo decadimento si dimostra un parametro particolarmente sensibile alla localizzazione del microfono in relazione alla sua distanza dalla sorgente. L'indice EDT, infatti, diminuisce con l'allontanarsi del microfono dalla sorgente e diventa un parametro particolarmente significativo per confrontare diversi punti di una stessa sala. I valori di riferimento forniti dal Jordan sono riportati nella **Tab.III**.

- ***T15 o IRT o Initial Reverberation Time o Tempo di Riverberazione Iniziale***

E' un parametro introdotto da Atal, Schroeder e Sessler. E' calcolata a -60 dB la pendenza media dei primi 15 dB del decadimento del livello della pressione sonora. Per questo parametro non sono stati reperiti in letteratura valori di riferimento.

- ***T20 o ANZ o Tempo di Riverberazione Iniziale***

E' un parametro introdotto da Kurer e Kurze. E' calcolato estrapolando a -60 dB la pendenza media dei primi 20 dB del decadimento del livello della pressione sonora. Per questo parametro la letteratura consultata non riporta valori di riferimento.

Tabella III

Definizione e campi di variazione dei parametri legati a prime riflessioni e riverberazione

Nome	Espressione analitica	Valori di riferimento	Unità
T ₆₀ : tempo di riverberazione; Sabine	$T_{60} = \frac{0.16 \cdot V}{A}$	lettura, dramma 0 < T ₆₀ < 1.0 teatri d'opera 1.2 < T ₆₀ < 1.8 sale per musica da camera 1.4 < T ₆₀ < 2.0 grandi sale da concerto 1.7 < T ₆₀ < 2.3 chiese 2.0 < T ₆₀ < 4.0	s
T ₁₀ : tempo di primo decadimento (Early Decay Time o EDT); Jordan	calcolato attraverso la retta di regressione lineare	1.8 < T ₁₀ < 2.6	s
T _B : equilibrio tonale (Tonal Balance o TB); Jordan	$T_B = \frac{[T_{10}(2kHz)_{ott} - T_{10}(250Hz)_{ott}]}{3}$	T _B ≈ 0	s
T ₁₅ : tempo di riverberazione iniziale (Initial Reverberation Time o IRT); Atal, Schroeder, Sessler	calcolato attraverso la retta di regressione lineare		s
T ₂₀ : tempo di riverberazione iniziale (ANZ); Kurer Kurze	calcolato attraverso la retta di regressione lineare		s
Bass Ratio o rapporto dei bassi; Beranek	$BR = \frac{T_{60(125Hz)_{ott}} + T_{60(250Hz)_{ott}}}{T_{60(500Hz)_{ott}} + T_{60(1000Hz)_{ott}}} = \frac{T_{60(125Hz)_{ott}} + T_{60(250Hz)_{ott}}}{2T_{med}}$	1.20 ≤ BR ≤ 1.25	s

Tempo di riverberazione alle frequenze medie; BERANEK	$T_{med} = \frac{T_{60(500Hz)_{ott}} + T_{60(1000Hz)_{ott}}}{2}$	orchestra sinfonica media Tmed=1.9 s opera italiana Tmed=1.5 s opera wagneriana Tmed=1.7 s	s
----------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---

• ***T_B o Tonale Balance o Equilibrio Tonale***

E' un parametro introdotto da Jordan ed è calcolato attraverso la seguente espressione:

$$T_B = \frac{[T_{10}(2kHz)_{ott} - T_{10}(250Hz)_{ott}]}{3} \quad [s]$$

Esso è definito come pendenza media del decadimento dei primi 10 dB, ovvero del tempo di primo decadimento, tra la banda di ottava a 250 Hz e la banda di ottava a 2000 Hz. E' calcolato con il metodo della retta di regressione lineare. Pur non esistendo un campo di riferimento dei valori, Jordan sostiene che una grande variazione dell'EDT tra le basse e le alte frequenze non favorisce un buon ascolto. Pertanto il valore a cui dovrebbe tendere l'equilibrio tonale è $T_B \approx 0$ s.

3.2.3 Le prime riflessioni laterali e spazialità

La percezione di un suono in un ambiente, come visto in precedenza, è legata soprattutto alla prima parte del tempo di decadimento del segnale ed al suo spettro, ovvero al contenuto energetico presente alle diverse frequenze. In realtà questi due aspetti non sono sufficienti a definire la sensazione acustica globale ricevuta da un ascoltatore in una sala. E' necessario, infatti, definire anche la direzione di arrivo delle prime riflessioni, in grado di fornire informazioni molto precise sul tipo di spazio in cui viene emesso e ricevuto il segnale. L'ascoltatore non percepisce le singole riflessioni separatamente, ma rielabora una sensazione globale che è detta *impressione spaziale*. Questa sensazione è tipica degli spazi chiusi ed è assente in campo libero. Perché la sensazione di spazialità sia evidente occorre che:

- al suono diretto siano associate riflessioni con ritardo non maggiore di 100 ms;
- le prime riflessioni giungano all'orecchio dell'ascoltatore da direzioni laterali;
- le prime riflessioni abbiano una intensità di percezione rispetto al suono diretto maggiore di un certo valore;
- le prime riflessioni siano pressoché mutuamente incoerenti.

I criteri ed i parametri che quantificano l'impressione spaziale sono:

• **L_f o Frazione della prima energia laterale o Lateral Fraction**

E' un parametro elaborato da Barron e Marshall ed è calcolabile con la seguente espressione:

$$L_f = \frac{\sum_{t=5ms}^{t=80ms} r \cdot \cos \Phi}{\sum_{t=0}^{t=80ms} r} \quad [\%]$$

Nell'espressione il numeratore rappresenta la somma dell'energia sonora r associata a ciascuna riflessione che giunge all'ascoltatore nell'intervallo di tempo da 5 a 80 ms dopo l'arrivo del suono diretto e pesata secondo il coseno dell'angolo Φ formato dalla direzione di arrivo della riflessione con la retta passante per i timpani dell'ascoltatore (rivolto verso la sorgente). Il denominatore, invece, rappresenta l'energia totale compreso il suono diretto all'istante $t=0$ che giunge all'ascoltatore nei primi 80 ms. La finestra temporale che determina l'energia del numeratore si apre 5 ms dopo l'arrivo del suono diretto che arriva sempre da una direzione frontale. Se si utilizzano microfoni con diagramma ad otto orientati in modo che la direzione di minore sensibilità sia rivolta verso la sorgente, l'integrazione dell'energia sonora a numeratore può anch'essa partire dall'istante $t=0$. I valori di riferimento reperiti in letteratura sono riportati nella **Tab. IV**.

• SI o Impressione spaziale (Spatial Impression)

E' un parametro proposto da Barron e Marshall e rappresenta l'espressione che lega L_f , o frazione della prima energia laterale, al grado di impressione spaziale. In questo modo è possibile dedurre analiticamente il parametro SI dal parametro L_f con la relazione $SI=14,5L_f-0,7=14,5(L_f-0,05)$.

Poiché esiste una considerevole dipendenza dell'indice SI dal livello di ascolto, gli autori hanno proposto poi una versione modificata dell'Indice di impressione Spaziale che tiene conto del livello medio del suono L nel punto di ascolto per confronto con un livello di riferimento L_0 secondo la relazione $SI=15,5(L_f-0,05)+(L-L_0)/4,5$.

In letteratura non sono stati reperiti valori di riferimento del parametro SI .

• R o impressione della sala

E' un parametro proposto da Reichart e Lehmann calcolabile con la relazione:

$$R = 10 \text{Log} \frac{\int_{25ms}^{25ms} p_k^2(t) dt - \int_{25ms}^{80} p_R^2(t) dt}{\int_0^{25ms} p_k^2(t) dt + \int_{25ms}^{80} p_R^2(t) dt} \quad [\text{dB}]$$

L'impressione della sala è quindi definita dal rapporto tra l'energia delle prime riflessioni laterali che giungono tra 25 ed 80 ms (escluso il suono diretto) e le prime riflessioni frontali (incluso il suono diretto) che giungono entro i primi 80 ms. Il numeratore rappresenta la differenza tra l'energia di tutto il decadimento, escluso il suono diretto, e l'energia delle prime riflessioni comprese tra 25 ed 80 ms che giungono frontalmente. Il denominatore rappresenta invece la somma dell'energia del suono diretto con l'energia delle prime riflessioni comprese tra 25 e 80 ms che giungono frontalmente.

$p_k(t)$ rappresenta il valore istantaneo della pressione sonora rilevata da un microfono omnidirezionale, $p_R(t)$ rappresenta la pressione sonora istantanea rilevata con un microfono direttivo orientato con l'asse di maggiore sensibilità verso la sorgente e con cono di apertura a sensibilità costante di 40° e nulla per il resto dell'angolo giro.

Nella relazione sono evidenziati i termini che influiscono positivamente e i termini che influiscono negativamente sull'impressione spaziale:

- è considerata utile per l'impressione di spazialità l'energia che giunge da tutte le direzioni dopo 25 ms $\left(\int_{25ms}^{\infty} p_k^2(t) dt \right)$;
- è considerata negativa l'energia che giunge dalla direzione frontale nella finestra temporale da 25 ad 80 ms $\left(\int_{25ms}^{80ms} p_R^2(t) dt \right)$;
- è considerata negativa anche l'energia che giunge dalla direzione frontale entro i primi 25 ms $\left(\int_0^{25ms} p_k^2(t) dt \right)$;
- è considerata infine anch'essa negativa l'energia che giunge dalla direzione frontale tra 25 ed 80 ms $\left(\int_{25ms}^{80ms} p_R^2(t) dt \right)$.

L'indice R dipende dalla distribuzione direzionale delle riflessioni. La letteratura consultata non fornisce valori di riferimento per questo parametro.

- **LE o Efficienza Laterale (Lateral Efficiency)**

E' un parametro proposto da Jordan come criterio per quantificare l'impressione spaziale:

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

L'efficienza laterale LE è definita come il rapporto tra l'energia sonora $p_{\infty}(t)$ associata alla risposta ad un impulso generato nella sala e proveniente dalle pareti laterali e l'energia complessiva rilevata nello stesso punto di ascolto. L'energia sonora è ottenuta dalla misura della pressione istantanea $p_{\infty}(t)$ di un impulso generato nell'area dell'orchestra e rilevata con un microfono con diagramma polare ad otto, orientato con l'asse di minore sensibilità verso la sorgente (gli altri due assi di maggiore sensibilità sono orientati quindi verso le pareti laterali), mentre l'energia sonora totale nel punto di ascolto è ottenuta dalla pressione istantanea $p_0(t)$ rilevata con un microfono omnidirezionale. Questo è un criterio basato sulla selezione temporale e direzionale dell'energia riflessa ed è facilmente misurabile. L'efficienza laterale LE si ricava in maniera molto simile alla *frazione laterale* L_f . Esistono comunque delle differenze che possono essere sintetizzate come segue:

- l'energia a numeratore è rilevata in un intervallo con finestre temporali diverse (per L_f tra 5-80 ms, per LE tra 25-80 ms);
- nella relazione analitica di L_f l'energia è pesata con il coseno dell'angolo Φ , mentre per l'efficienza laterale LE è la pressione sonora ad essere pesata con $\cos \Phi$.

I valori di riferimento forniti dalla letteratura sono riportati in **Tab.IV**.

- **K o Funzione di Correlazione Mutua Internaurale**

Il parametro è così definito:

$$K_{(\tau)} = \frac{\int_{t=0}^{t=\infty} p_d(t) \cdot p_s(t + \tau) dt}{\left[\int_{t=0}^{t=\infty} p_d^2(t) dt + \int_{t=0}^{t=\infty} p_s^2(t) dt \right]^{1/2}}$$

I termini riportati nella formula hanno il seguente significato:

- τ : è inteso come un ritardo corrente;
- p_d e p_s : rappresentano rispettivamente la pressione sonora all'orecchio destro e la pressione all'orecchio sinistro.

Questa relazione traduce il diverso grado di pressione sonora che giunge a ciascun orecchio dell'ascoltatore, creando una correlazione tra le due diverse percezioni che risulta connessa all'impressione spaziale. La letteratura consultata non fornisce valori di riferimento per questo parametro.

Tabella IV
Definizioni e campi di variazione dei parametri legati alle prime riflessioni laterali e alla spazialità

Parametro	Relazione	Valore di riferimento	unità
L_f Prima energia laterale (Lateral Fraction); Barron e Marshall	$L_f = \frac{\sum_{t=5ms}^{t=80ms} r \cdot \cos \Phi}{\sum_{t=0}^{t=80ms} r}$	sale da concerto >0.25	%
SI Impressione spaziale (Spatial Impression o); Barron e Marshall	$SI=14,5L_f-0,7=14,5(L_f-0,05)$		
	$SI=15,5(L_f-0,05)+(L-L_0)/4,5$		
R Indice dell'impressione della sala Reichard e Lehmann	$R = 10 \text{Log} \frac{\int_{25ms}^{25ms} p_i^2(t) dt - \int_{25ms}^{80} p_R^2(t) dt}{\int_0^{25ms} p_i^2(t) dt + \int_{25ms}^{80} p_R^2(t) dt}$		dB
efficienza laterale (Lateral Efficiency o LF); JORDAN	$LE = \frac{\int_{25ms}^{80ms} p_\infty^2(t) dt}{\int_0^{80ms} p_0^2(t) dt}$	possibile localizzazione acustica ≥ 0.1 sentirsi immersi nella musica ≥ 0.2	%
Coefficiente di correlazione mutua interaurale (Ear-related Cross-correlation coefficient o ECCC)	$K_{(\tau)} = \frac{\int_{t=0}^{t=\infty} p_d(t) \cdot p_s(t + \tau) dt}{\left[\int_{t=0}^{t=\infty} p_d^2(t) dt + \int_{t=0}^{t=\infty} p_s^2(t) dt \right]^{1/2}}$	possibile localizzazione acustica ≥ 0.7 sentirsi immersi nella musica ≥ 0.3	

Rispetto alle caratteristiche spettrali delle prime riflessioni laterali Barron e Marshall ritengono che il campo di frequenze importante per l'impressione spaziale sia dato dalle frequenze incluse tra la banda di ottava di 125 Hz e la banda di ottava di 1000 Hz, dove:

- la parte delle frequenze più basse contribuisce alla sensazione di suono avvolgente (envelopment);
- la parte superiore dello spettro è responsabile dell'allargamento della sorgente (source broadening).

Le riflessioni laterali con maggior energia sonora alle frequenze più elevate (nelle bande di ottava 2000 e 4000 Hz) possono produrre uno spostamento nella localizzazione acustica della sorgente e un suono privo di corpo.

3.2.4 Livello e trasmissione del suono

Abbiamo già accennato all'importanza del suono diretto nell'ascolto della musica, e quindi alla necessità di misurare il livello sonoro percepito dall'ascoltatore in relazione alla posizione ed alla potenza di emissione della sorgente. A tale scopo è stato proposto un parametro, già precedentemente citato:

- **G o Indice di intensità**

E' definito dalla relazione:

$$G = 10 \cdot \text{Log} \frac{\int_{t=0}^{t=\infty} p^2(t) dt}{4\pi s^2 \int_{t=0}^{t=\Delta t} p_s^2(s, t) dt} \quad \text{dB}$$

In questa relazione $p(t)$ rappresenta la risposta nel punto di osservazione ad un impulso emesso da una sorgente omnidirezionale sul palcoscenico e $p(s,t)$ è la risposta allo stesso impulso in un punto fisso nella sala a distanza s dalla sorgente (considerata pari a 5 m); Δt è la durata dell'impulso diretto.

L'indice G può essere inteso anche come la differenza tra il livello della pressione sonora nel punto di ascolto e il livello della potenza sonora emessa dalla sorgente.

$$G = L_p - L_w$$

I valori di riferimento relativi a tale parametro sono contenuti nella **Tab.V**.

Tabella V

Definizioni e campi di variazione dei parametri legati al livello e alla trasmissione del suono

Parametro	Relazione	Valore di riferimento	Unità
Indice di intensità (G)	$G = 10 \cdot \text{Log} \frac{\int_{t=0}^{t=\infty} p^2(t) dt}{4\pi r_s^2 \int_{t=0}^{t=\Delta t} p_s^2(s,t) dt}$	grande orchestra sinfonica, cantanti molto allenati $G \geq -35$ dB piccola orchestra, cantanti allenati $G \geq -30$ dB oratori, attori allenati $G \geq -25$ dB strumenti deboli, oratori poco allenati $G \geq -20$ dB	dB

3.3 DETERMINAZIONE DELLE PRESTAZIONI DELLE SALE DA CONFERENZA

Per determinare le prestazioni di una sala adibita a conferenze o all'impiego esclusivo della parola vengono tradizionalmente considerati due aspetti distinti:

- l'acustica dell'ambiente definita attraverso la misura del tempo di riverberazione;
- il rapporto segnale / rumore definito attraverso la misura del livello di rumore di fondo presente in sala.

Per caratterizzare meglio l'intelligibilità del parlato in una sala sono stati sviluppati numerosi criteri tra i quali si ricordano:

• AI o indice di articolazione (Articulation index)

Sviluppato nei laboratori della Bell Telephone fu utilizzato da Cavanaugh. Consiste nella stima pesata del rapporto segnale/rumore di fondo, dove per segnale è da intendersi il livello della voce normale misurato nel punto in cui si trova l'uditore.

• SIL o Livello di interferenza con il parlato (Speech Interference Level)

Sviluppato da Beranek per valutare la comprensibilità della parola all'interno delle cabine degli aerei, si discosta poco dalla definizione dell'indice AI. Esso è definito dalla media aritmetica del livello di pressione sonora nelle tre bande di ottava tra 600 ed 4800 Hz (vecchia definizione delle bande in frequenza centrate su 800 Hz) per il solo rumore di fondo. Con la nuova definizione delle bande di ottava (centrate su 1000 Hz) il SIL fu modificato nel nome PSIL (Preferred Speech Interference Level) e nella definizione, prevedendo la media dei livelli sonori del rumore di fondo nelle bande di 500, 1000 e 2000 Hz. Per valutare l'intelligibilità del parlato ci si riferisce poi ad una tavola che fornisce, per ciascun valore del SIL, il livello della voce richiesto per comunicare in relazione anche alla distanza tra parlatore ed ascoltatore.

- **AL_{cons} o Perdita di articolazione delle consonanti (Articulation Losses of consonants)**

Introdotta da Peutz per valutare la comprensibilità della parola nelle sale esprime l'intelligibilità del parlato attraverso un grado di cattiva comprensione delle consonanti. L'indice AL_{cons} è espresso in % ed è fornito dalla seguente equazione:

$$AL_{cons} = \frac{200 \cdot D^2 T^2}{V} \quad [\%]$$

dove D è la distanza dell'ascoltatore dalla sorgente, T è il tempo di riverberazione dell'ambiente e V è il suo volume.

Oltre la distanza critica definita da Peutz $D_{crit} = 0.2 \sqrt{\frac{V}{T}}$ La perdita di articolazione delle consonanti è proporzionale al tempo di riverberazione secondo la relazione: $AL_{cons} = 9 \cdot T$ ed è espressa in %.

Alcune varianti alla espressione originaria sono state introdotte da altri autori. Se si vuol tener conto del rapporto di direttività Q del sistema di altoparlanti la relazione diventa:

$$AL_{cons} = \frac{200 \cdot D^2 T^2}{VQ} \quad [\%]$$

Se si utilizza per il calcolo di AL_{cons} la risposta all'impulso del locale la relazione che fornisce la perdita di articolazione delle consonanti può essere ottenuta utilizzando la seguente relazione:

$$AL_{cons} = 10^{-2[(A+B)-AB]} + 0.015$$

$$A = \frac{-0.32 \text{Log}(L_R - L_N)}{10L_D + L_R + L_N}$$

$$B = -0.32 \text{Log} \left[\frac{L_N}{10L_R + L_N} \left(-0.5 \cdot \text{Log} \left(\frac{T}{12} \right) \right) \right]$$

dove $L_D = 10^{dB_D/10}$ è il livello del suono diretto in dB espresso come rapporto di potenze

$L_R = 10^{dB_R/10}$ è il livello del suono riverberato in dB espresso come rapporto di potenze

$L_N = 10^{dB_N/10}$ è il livello del rumore di fondo espresso come rapporto di potenze

T è il tempo di riverberazione in secondi

Trattandosi di un indice che esprime una perdita di articolazione delle consonanti quanto tale indice è elevato tanto aumenta l'incomprensibilità della parola. Peutz asserisce che se AL_{cons} è inferiore al 10% l'intelligibilità del parlato è molto buona. Valori tra 10 e 15 % portano ad una intelligibilità buona con qualche difficoltà se il parlatore non ha una buona pronuncia o l'ascoltatore non è addestrato all'ascolto. Valori superiori al 15% sono da ritenersi indice di non buona intelligibilità.

Se si tiene come limite il valore del 15% gli esperimenti condotti evidenziano che per sale con tempi di riverberazione superiori a 1.5 secondi occorre mantenere un rapporto di segnale rumore non inferiore a 25 dB. In sale con tempo di riverberazione di 0.5 s si mantiene la stessa percentuale di perdita di articolazione delle consonanti del 15% con un rapporto segnale rumore di soli 11 dB.

• **D o Frazione della prima energia (early energy fraction)**

Si misura con eccitazione impulsiva del locale ed è definita dal rapporto:

$$D = \frac{\int_{t=0}^{t=50ms} p^2(t) dt}{\int_{t=0}^{t=\infty} p^2(t) dt}$$

cioè il rapporto tra l'energia contenuta nei primi 50 ms del segnale impulsivo ricevuto nel posto dell'uditore e l'energia totale ricevuta limitatamente all'impulso generato. La relazione suddetta presuppone un brusco taglio del segnale dopo 50 ms dall'arrivo dell'impulso diretto che non trova riscontro nel meccanismo uditivo.

• **Rapporto di Lochner e Burger**

Le considerazioni sui meccanismi uditivi hanno indotto gli autori a modificare la definizione della frazione della prima energia D pesando il quadrato del valore istantaneo della pressione a numeratore con una funzione di pesatura temporale $\alpha(t)$. Attraverso numerosi esperimenti di intelligibilità della parola in campo simulato, gli autori hanno dedotto che l'energia dannosa arriva dopo 95 ms per cui il rapporto è ora definito dalla relazione:

$$10 \cdot \text{Log} \left[\frac{\int_{t=0}^{t=95ms} \alpha(t) \cdot p^2(t) dt}{\int_{t=95ms}^{t=\infty} p^2(t) dt} \right] \quad \text{dB}$$

• **U_{80} o Rapporto tra energia utile / energia dannosa**

Il rapporto energia utile / energia dannosa è stato definito da Lochner e Burger, attraverso approfonditi studi sperimentali, come il rapporto logaritmico di una somma pesata di prima energia o energia utile con la somma dell'ultima energia rispetto al rumore di fondo (ultima energia e rumore di fondo sono considerati contributi che diminuiscono l'intelligibilità). E' stato visto poi come non fosse necessario pesare il numeratore (ovvero l'energia utile) con metodi complicati, in quanto era sufficiente considerare la somma della prima energia o energia utile non pesata. Il rapporto energia utile / energia dannosa prevede l'individuazione di un limite temporale entro il quale l'energia che giunge all'ascoltatore aumenta l'intelligibilità. Tale limite è stato individuato nei primi 50-80 millisecondi. Entrambi i valori si sono dimostrati fortemente correlati all'intelligibilità del parlato. Considerando il limite di 80 millisecondi, si definisce il rapporto energia utile / energia dannosa o U_{80} come segue:

$$U_{80} = 10 \cdot \text{Log} \frac{C_{80}}{1 + (C_{80} + 1) \cdot \frac{E_n}{E_s}} \quad [\text{dB}]$$

dove C_{80} è un rapporto di energie ed è dato dalla seguente espressione:

$$C_{80} = \frac{E_{\text{utile}}}{E_{\text{dannosa}}} = \frac{E_{(0-80)\text{ms}}}{E_{(80-\infty)\text{ms}}} \quad [\text{unità lineari}]$$

Il rapporto E_n / E_s è anch'esso un rapporto di energie dove E_n rappresenta l'energia dovuta al rumore presente nell'ambiente ed E_s rappresenta l'energia del parlato rilevata nella posizione dell'ascoltatore. Il livello di rumore presente in ambiente è espresso in dB(A), mentre il livello del parlato misurato nella posizione dell'ascoltatore è dato, generalmente, come spettro in bande d'ottava.

- **STI o Indice di trasmissione del parlato (Speech Transmission Index)**

Si basa su un concetto totalmente diverso che racchiude in una sola misura sia la risposta all'impulso della sala sia il rapporto segnale/rumore. Opportuni adattamenti, poi, hanno consentito anche di poter realizzare uno strumento che fornisce il valore con misure dirette in ambiente.

L'idea si basa su una osservazione di Hougast il quale asserisce che una buona intelligibilità in un ambiente si mantiene se si trasmette inalterato l'involuppo del segnale vocale. Per misurare la distorsione dell'involuppo si modula un rumore con un segnale sinusoidale; si tratta di adattare all'acustica la misura della funzione di trasferimento modulata o Modulation Transfer Function (MTF) utilizzata in ottica; in questo modo può essere definito anche l'indice di trasmissione del parlato o Speech Transmission Index (STI). L'adattabilità alla misura pratica della funzione di trasferimento è stata denominata RASTI (RAPid Speech Transmission Index).

E' necessario innanzitutto premettere che una buona intelligibilità del parlato, una perfetta trasmissione della parola, impone che il tempo necessario all'oratore per emettere un suono sia pari a quello impiegato dall'ascoltatore per percepire lo stesso suono. Questo fenomeno non si verifica mai nella realtà perché le caratteristiche acustiche dell'ambiente intervengono negativamente sul segnale trasmesso. Generalmente, infatti, si ha una riduzione della modulazione in ampiezza del segnale dovuta al rumore di fondo e alla riverberazione dell'ambiente (**Fig.2**). Il fattore di riduzione della modulazione, espresso come una funzione della portante modulata, è chiamata Modulation Transfer Function o MTF.

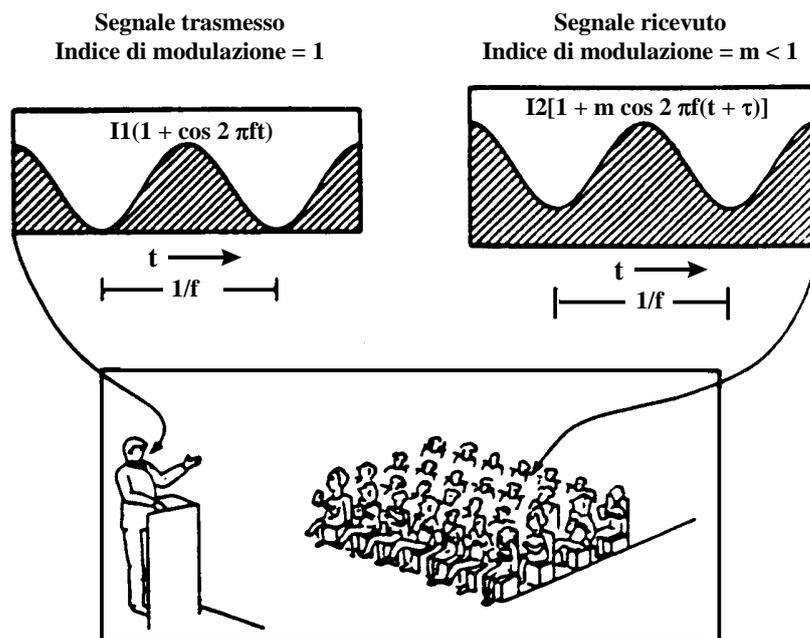


Fig.2 - Riduzione della modulazione di un segnale vocale prodotta dal rumore di fondo e dalla riverberazione dell'ambiente.

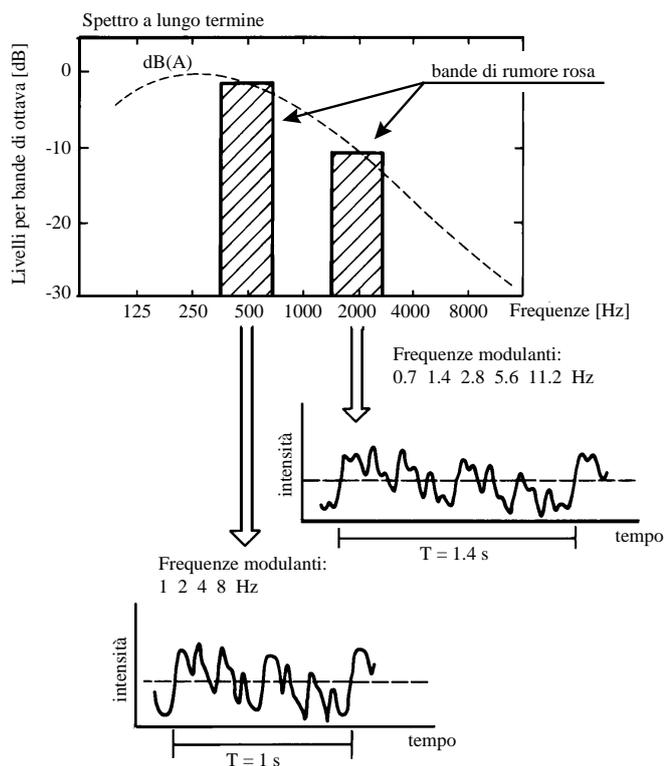


Fig.3 - Illustrazione del segnale RASTI ottenuto per modulazione delle due bande di rumore rosa a 500 e a 2000 Hz.

Il metodo RASTI (**Fig.3**) consiste nella misura della riduzione in modulazione di un segnale di prova emesso nella posizione dell'oratore. Tale segnale possiede alcune caratteristiche tipiche della voce umana. Esso è sintetizzato da un segnale portante composto dalle due bande di ottava (500 e 2000 Hz) di un rumore rosa. I livelli sonori prodotti da questo tipo di segnale nelle due bande di frequenza citate sono uguali ai livelli medi trovati nel parlato: 59 dB nella banda di ottava di 500 Hz e 50 dB nella banda di ottava di 2000 Hz alla distanza di 1 m dalla sorgente. Le modulazioni alle basse frequenze presenti nella voce umana vengono simulate utilizzando 9 frequenze discrete di segnale modulante tra 1 Hz e 11.2 Hz. Più precisamente le frequenze del segnale modulante che agiscono simultaneamente sulle due portanti sono le seguenti:

- per il segnale portante a 500 Hz: 1 Hz, 2 Hz, 4 Hz, 8 Hz.
- per il segnale portante a 2000 Hz: 0.7 Hz, 1.4 Hz, 2.8 Hz, 5.6 Hz, 11.2 Hz.

La misura dell'indice RASTI viene eseguita analizzando con un particolare apparecchio nel posto di ascolto il segnale RASTI emesso da un altoparlante che simula le proprietà della bocca e che è collocato nel posto dell'oratore. Il segnale acquisito consente di calcolare i 9 indici di riduzione della modulazione e di dedurre conseguentemente il rapporto segnale/rumore. Infatti in origine il segnale deve essere modulato con indice di modulazione per ciascun segnale modulante pari a 0.4 per la portante a 500 Hz e 0.32 per la portante a 2 kHz. La misura della profondità di modulazione del segnale ricevuto deve essere riferita a questi due valori del segnale trasmesso. L'indice RASTI è ottenuto dalla media aritmetica del rapporto segnale apparente/rumore. Questa media aritmetica viene ancora normalizzata in modo che l'indice RASTI sia compreso tra 0 e 1. La Modulation Transfer Function o MTF, la funzione su cui è basato il calcolo dell'indice RASTI, è data dalla seguente relazione:

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

dove: $m(F)$ = la riduzione in modulazione alla frequenza F di modulazione.

T = prima parte di decadimento della riverberazione, misurato tra la posizione dell'oratore e quella dell'ascoltatore considerato.

Il valore m , ottenuto da questa funzione, può essere interpretato come il rapporto segnale apparente/rumore. Infatti, un'onda modulata in ampiezza è definita come un'onda il cui inviluppo contiene una componente simile alla forma d'onda del segnale che deve essere trasmesso. Se la forma d'onda dell'inviluppo ricevuto è simile alla forma dell'inviluppo del segnale trasmesso, la modulazione è detta *lineare* e non si ha distorsione. L'equazione di un'onda portante modulata in ampiezza è data dalla seguente espressione:

$$e(t) = \left(E_{0m} + mE_{0m} \sin(qt)\right) \sin \omega t$$

Il coefficiente dell'onda portante di pulsazione ω rappresenta la funzione che modula l'ampiezza del segnale. Il termine m è detto *fattore* o *indice di modulazione* ed è definito, per la modulazione di ampiezza, dal rapporto della semidifferenza tra ampiezza massima e minima rispetto all'ampiezza media del segnale portante. La Modulation Transfer Function o MTF

rappresenta proprio questo fattore m o *indice di modulazione*. Tale funzione deve essere misurata per tutti e nove i segnali apparenti, uno per ogni frequenza di modulazione:

$$X_i = 10 \cdot \text{Log} \left(\frac{m_i}{1 - m_i} \right)$$

dove X_i rappresenta il segnale apparente corrispondente al fattore di riduzione della modulazione misurato, cioè m_i .

I valori X_i vengono troncati quando $X_i = \pm 15$ dB in modo che:

se $X_i > 15$ dB, allora $X_i = 15$ dB;

se $X_i < -15$ dB, allora $X_i = -15$ dB;

I valori dei 9 parametri X_i vengono ancora mediati e normalizzati in modo da restituire il valore dell'indice RASTI nell'intervallo tra 0 e 1:

$$RASTI = \frac{\bar{X}_i + 15}{30}$$

Diversi autori hanno sperimentato una dipendenza tra l'indice AL_{cons} e l'indice STI . Le relazioni:

$$AL_{cons} = 170.5405 \cdot e^{-5.419 \cdot STI}$$

$$STI = -0.1845 \text{Ln}(AL_{cons}) + 0.9482$$

consentono di passare da un'indice all'altro

Nella tabella che segue si riporta il campo dei valori dell'indice RASTI legati a diverse qualità di ascolto della sala. Nella stessa tabella si riportano anche i valori della perdita di articolazione delle consonanti AL_{cons} .

Tabella VI
Valori limite dei parametri RASTI e AL_{cons} per diverse qualità della sala

Qualità della sala	Valore dell'indice RASTI	% dell'indice AL_{cons}
CATTIVA	0.20 - 0.28	57.7 % - 37.4 %
POVERA	0.30 - 0.42	33.6 % - 17.5 %
DISCRETA	0.44 - 0.58	15.7 % - 7.4 %
BUONA	0.60 - 0.76	6.6 % - 2.8 %
ECCELLENTE	0.78 - 1.00	2.5 % - 0.0 %

4. Conclusioni

La trattazione sopra esposta invece di chiarire in modo semplice e lineare quali debbano essere i requisiti e le prestazioni delle sale per il pubblico, senz'altro rende più confuso l'approccio al problema per la definizione degli elementi iniziali di progetto e per la messa a punto delle metodiche di valutazione della resa acustica di una sala. In effetti la confusione

dipende dalla proliferazione di indici più o meno significativi, molti dei quali sono poi scarsamente utilizzati nella pratica professionale.

In sintesi, a parere dello scrivente che ha avuto modo di verificare la significatività dei parametri in 5 sale con acustica estremamente diversa (una chiesa con acustica pessima, una chiesa con acustica buona per il parlato e per la musica d'organo dopo un intervento di trattamento acustico, un teatro appositamente progettato per la prosa, un teatro d'opera da restaurare ed un teatro d'opera aperto al pubblico) e che si è occupato della progettazione e del collaudo di diverse sale, un protocollo operativo per la verifica delle prestazioni delle sale dovrebbe contemplare i seguenti parametri:

auditorium	<ul style="list-style-type: none"> • andamento del tempo di riverberazione in funzione della frequenza • tempo iniziale di ritardo; • chiarezza; • definizione; • efficienza laterale; • impressione spaziale; • misura del rumore di fondo in sala prodotto dagli impianti e da sorgenti di riferimento poste nei corridoi; • misura del rumore di fondo eventualmente indotto dal traffico;
teatri d'opera	<ul style="list-style-type: none"> • andamento del tempo di riverberazione in funzione della frequenza e tempo iniziale di ritardo in sala per emissioni sul palco e nella fossa d'orchestra; • andamento del tempo di riverberazione in funzione della frequenza e tempo iniziale di ritardo sul palco per emissioni sul palco; • andamento del tempo di riverberazione in funzione della frequenza e tempo iniziale di ritardo nella fossa d'orchestra per emissioni nella fossa d'orchestra; • efficienza laterale in sala; • impressione spaziale in sala; • mappe di distribuzione dei livelli sonori e misura della chiarezza e della definizione in sala per sorgenti sul palco e nella fossa d'orchestra; • mappe di distribuzione dei livelli sonori e misura della chiarezza e della definizione sul palco per sorgenti nella fossa d'orchestra; • mappe di distribuzione dei livelli sonori e misura della chiarezza e della definizione nella fossa d'orchestra per sorgenti sul palco; • misura del rumore di fondo in sala, sul palco e nella fossa d'orchestra prodotto dagli impianti e da sorgenti esterne alla sala;
teatri di prosa	<ul style="list-style-type: none"> • andamento del tempo di riverberazione in funzione della frequenza e tempo iniziale di ritardo in sala per emissioni sul palco; • andamento del tempo di riverberazione in funzione della frequenza e tempo

	<p>iniziale di ritardo sul palco per emissioni sul palco;</p> <ul style="list-style-type: none">• efficienza laterale in sala;• impressione spaziale in sala;• mappe di distribuzione dei livelli sonori e misura della chiarezza e della definizione in sala per sorgenti sul palco;• misura dell'indice RASTI;
sale per conferenza	<ul style="list-style-type: none">• andamento del tempo di riverberazione in funzione della frequenza e tempo iniziale di ritardo;• mappe di distribuzione dei livelli sonori in sala e misura della chiarezza e della definizione per emissione dagli altoparlanti dell'impianto di amplificazione;• misura dell'indice RASTI in tutti i posti della sala e mappatura dei valori;• misura del rumore degli impianti e determinazione della dinamica;• misura della distorsione e del livello in sala per la massima amplificazione degli impianti.

L'esperienza dell'acustico, acquisita nella verifica diretta delle prestazioni acustiche in ambienti diversi o assimilata osservando studi effettuati da altri ricercatori, è alla base della corretta progettazione di nuovi spazi per il pubblico, permettendo di tradurre il risultato finale nei requisiti più idonei da individuare come dati iniziali di progetto.

CRITERI ACUSTICI NELLA PROGETTAZIONE DELLE SALE



STUDIO DI INGEGNERIA ACUSTICA

ing. Raffaele PISANI

Via Cavalieri di Vittorio Veneto, 8

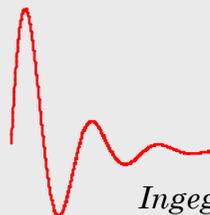
10098 - Rivoli (TO)

Tel. / Fax 011-9561261

COLLABORATORI

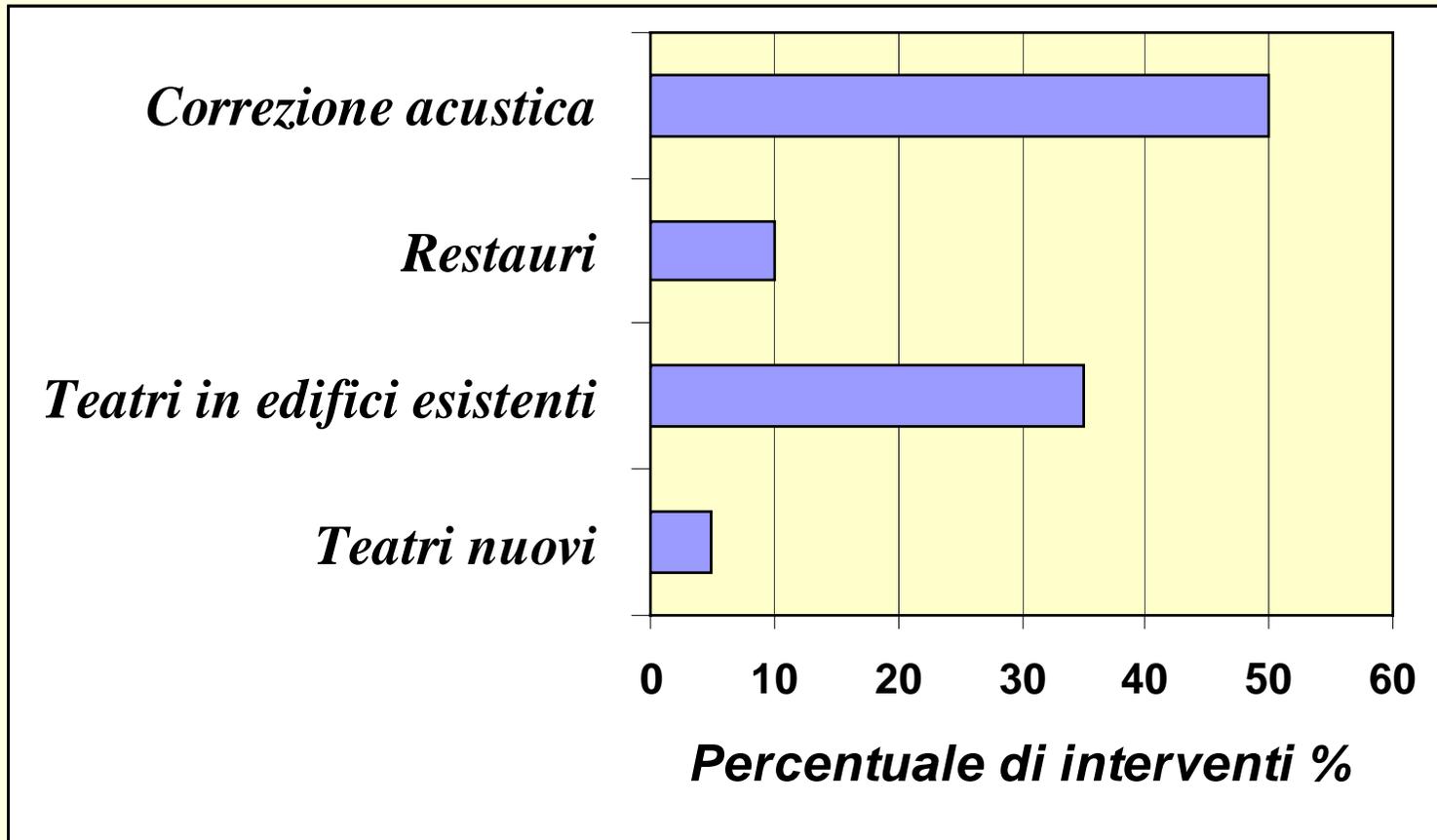
Ing. Davide Squarciapino

Arch. Arianna Astolfi


Pisani
*Studio di
Ingegneria Acustica*

CRITERI ACUSTICI NELLA PROGETTAZIONE DELLE SALE

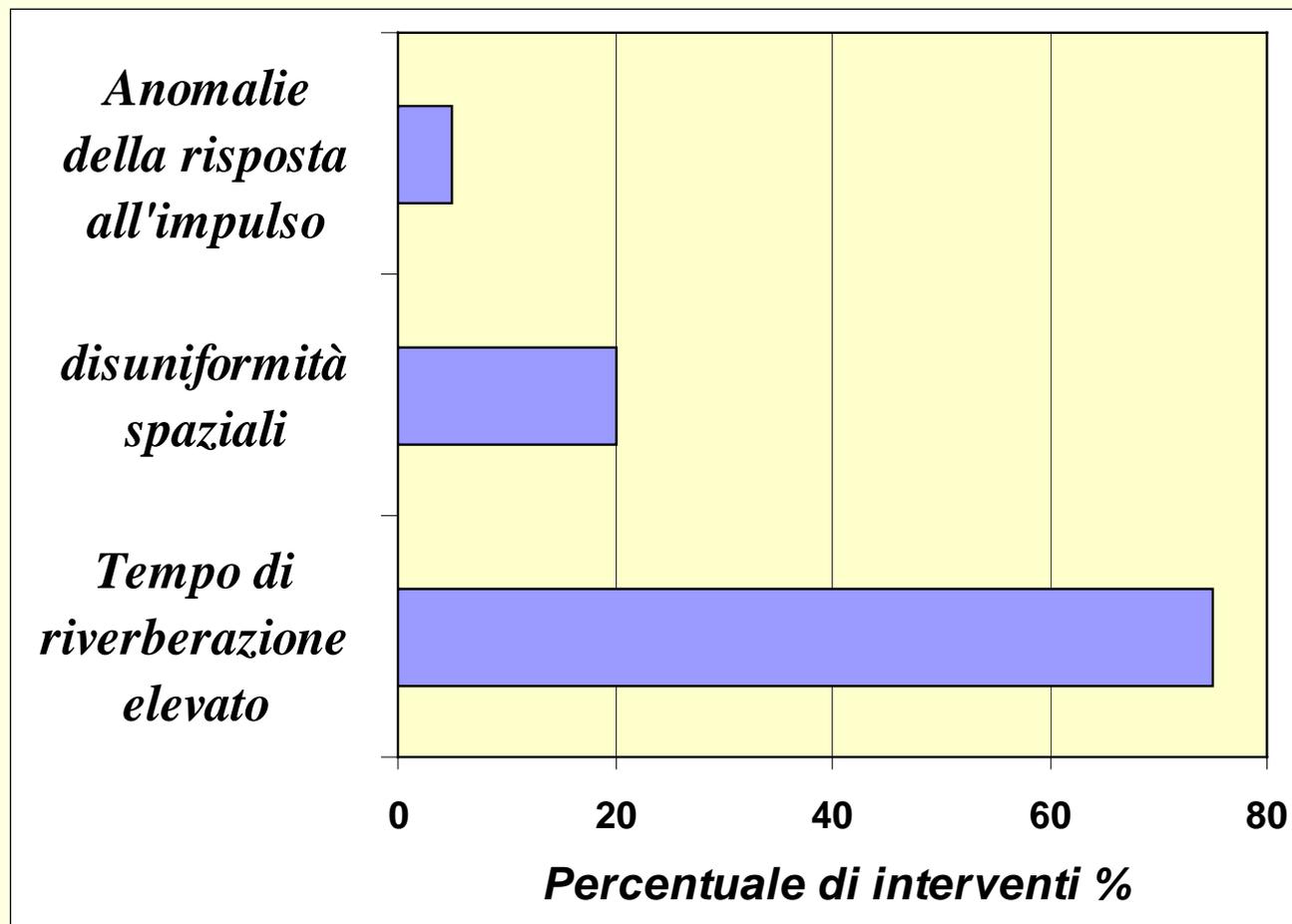
Le richieste di interventi di acustica



**Ciascun tipo di intervento richiede
approcci progettuali diversi**

CRITERI ACUSTICI NELLA PROGETTAZIONE DELLE SALE

Le anomalie tipiche di una sala



Perché uno spazio per voce e musica non è adeguato

CRITERI ACUSTICI NELLA PROGETTAZIONE DELLE SALE

Gli insegnamenti dall'antichità

Teatro greco di Siracusa



CRITERI ACUSTICI NELLA PROGETTAZIONE DELLE SALE

Gli insegnamenti dall'antichità

Teatro romano di Taormina



CRITERI ACUSTICI NELLA PROGETTAZIONE DELLE SALE

Gli insegnamenti dall'antichità



Secondo alcuni storici le maschere utilizzate dagli attori nei teatri greci avevano anche la funzione di amplificare la voce

CRITERI ACUSTICI NELLA PROGETTAZIONE DELLE SALE

Gli insegnamenti dall'antichità



I vasi di Vitruvio hanno una reale consistenza acustica?



Sul palcoscenico del teatro comunale di Livorno sono incastrati nelle pareti due vasi che potrebbero avere una funzione di serbatoio d'acqua; alcuni ritengono che abbiano, invece, una funzione acustica

CRITERI ACUSTICI NELLA PROGETTAZIONE DELLE SALE

Gli insegnamenti dall'antichità



Teatro comunale di Livorno. Particolare dei due vasi



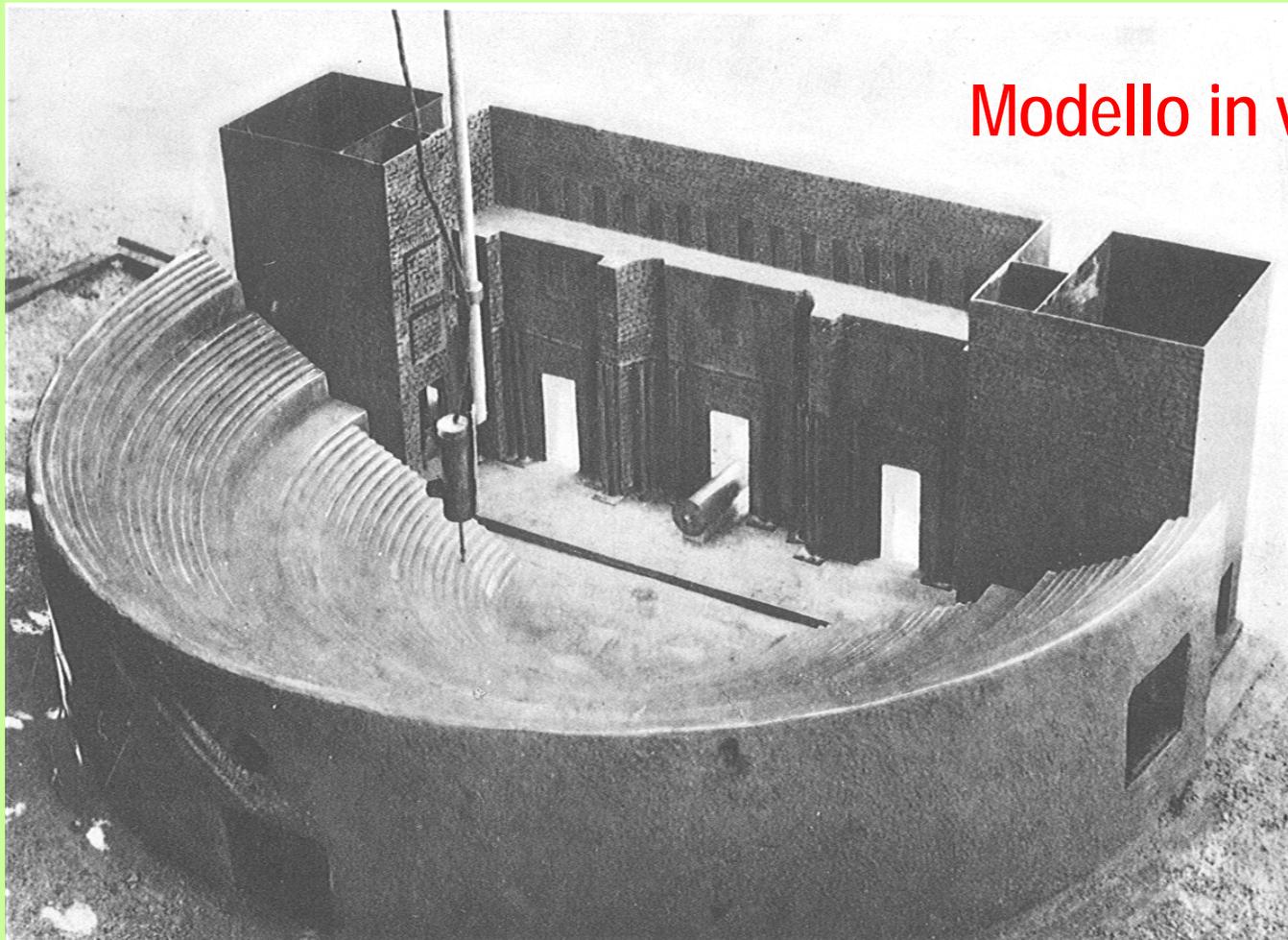
Altri due vasi sono stati ritrovati sulla torre scenica in prossimità della graticcia.

CRITERI ACUSTICI NELLA PROGETTAZIONE DELLE SALE

I primi tentativi di studio con i modelli



*In epoche più recenti (1930-1940)
i teatri sono stati studiati utilizzando modelli in scala*



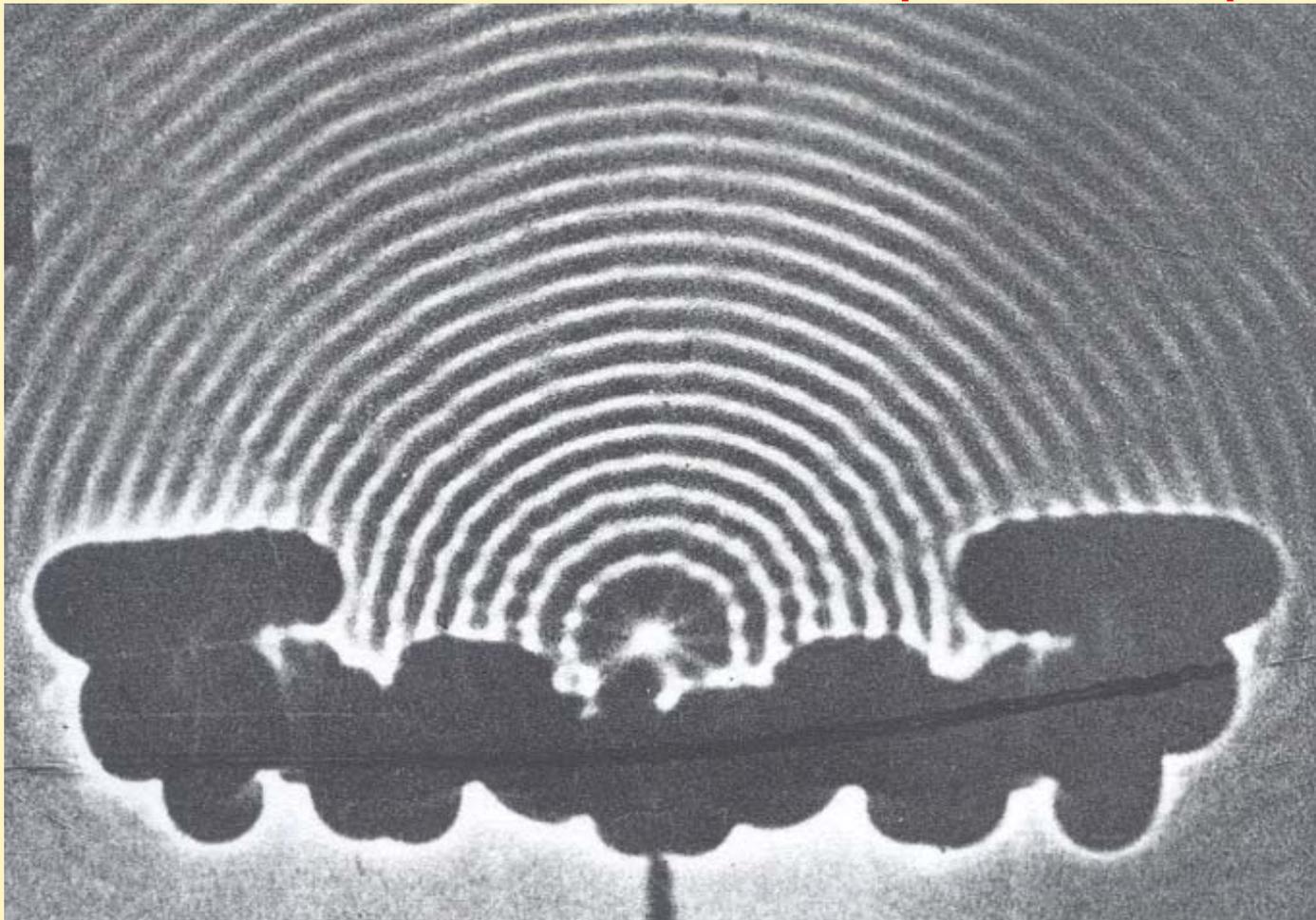
Modello in vasca d'acqua

CRITERI ACUSTICI NELLA PROGETTAZIONE DELLE SALE

I primi tentativi di studio con i modelli



Particolare di studio della scena con onde eccitate sul pelo dell'acqua



CRITERI ACUSTICI NELLA PROGETTAZIONE DELLE SALE

Progetto tradizionale e di base



**Riguarda principalmente
la geometria della sala ed i materiali
fonoassorbenti e diffondenti il suono**

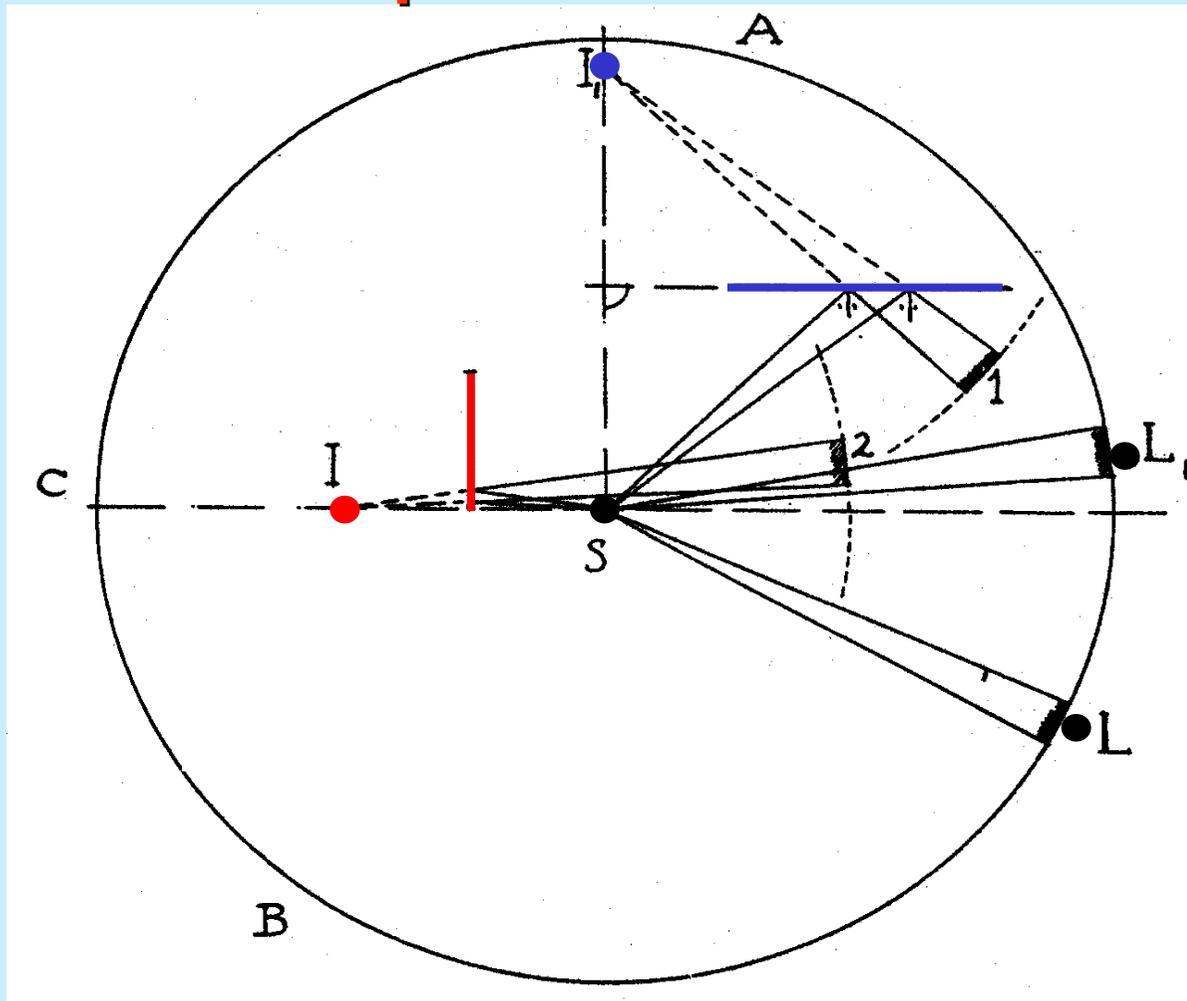
- La forma viene studiata con le regole dell'ottica geometrica
- I materiali vengono definiti in base ai requisiti acustici richiesti

CRITERI ACUSTICI NELLA PROGETTAZIONE DELLE SALE

Le leggi della riflessione del suono



Costruzione geometrica delle riflessioni del muro posteriore e del soffitto piano



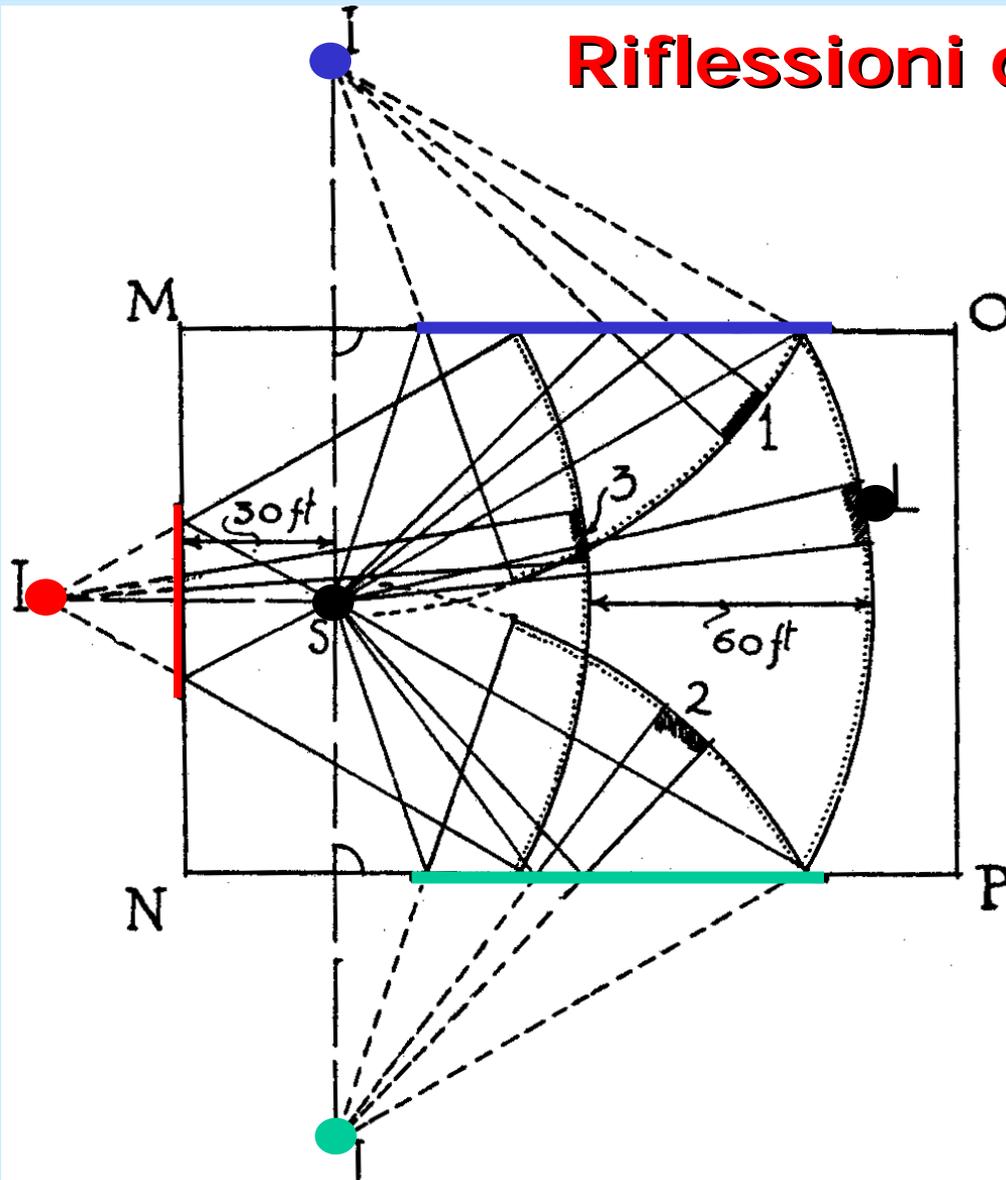
S – sorgente
L – punto di ascolto
I – sorgente immagine

CRITERI ACUSTICI NELLA PROGETTAZIONE DELLE SALE

Le leggi della riflessione del suono



Riflessioni delle pareti laterali

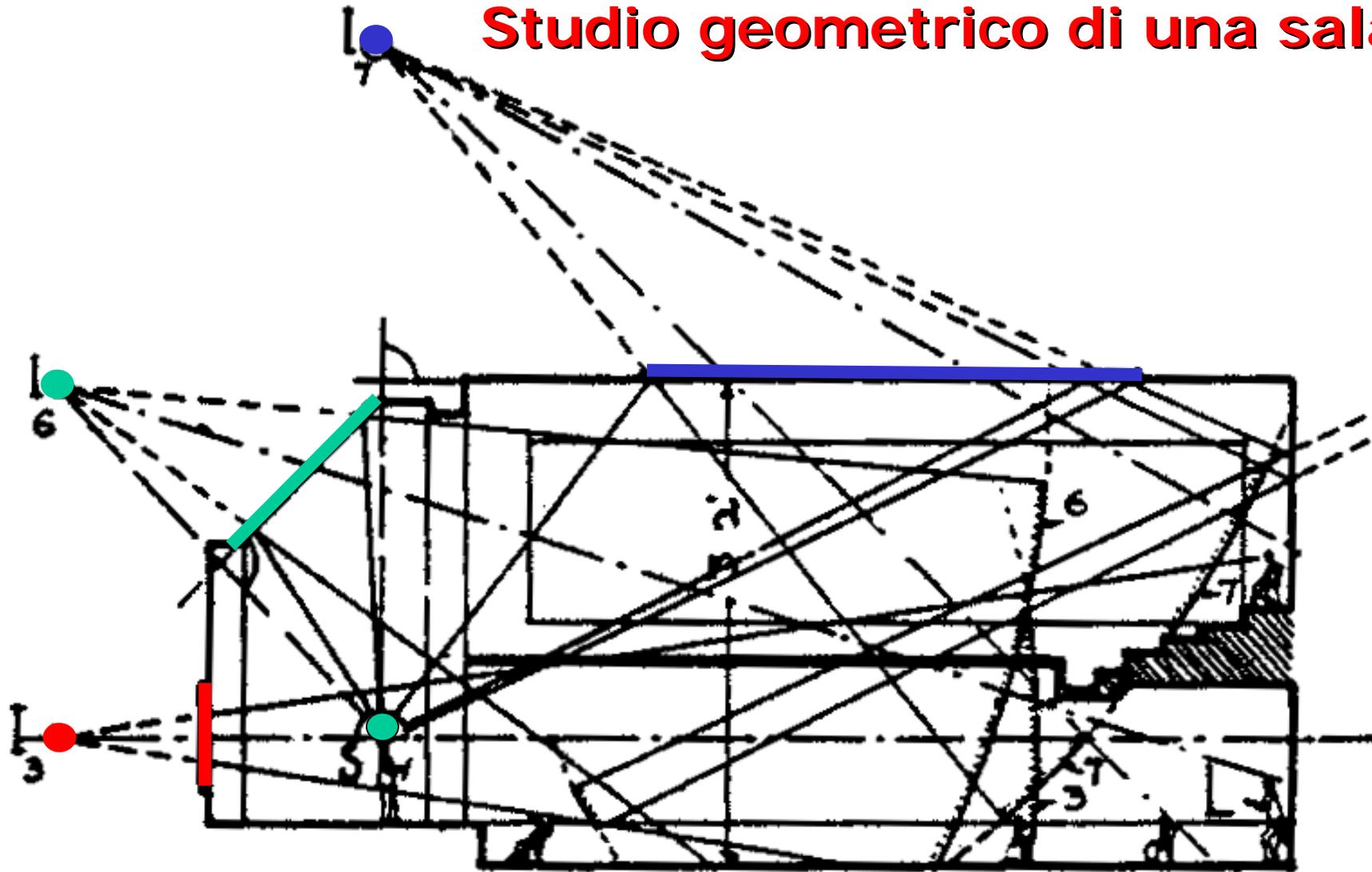


CRITERI ACUSTICI NELLA PROGETTAZIONE DELLE SALE

Le leggi della riflessione del suono

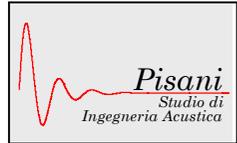


Studio geometrico di una sala

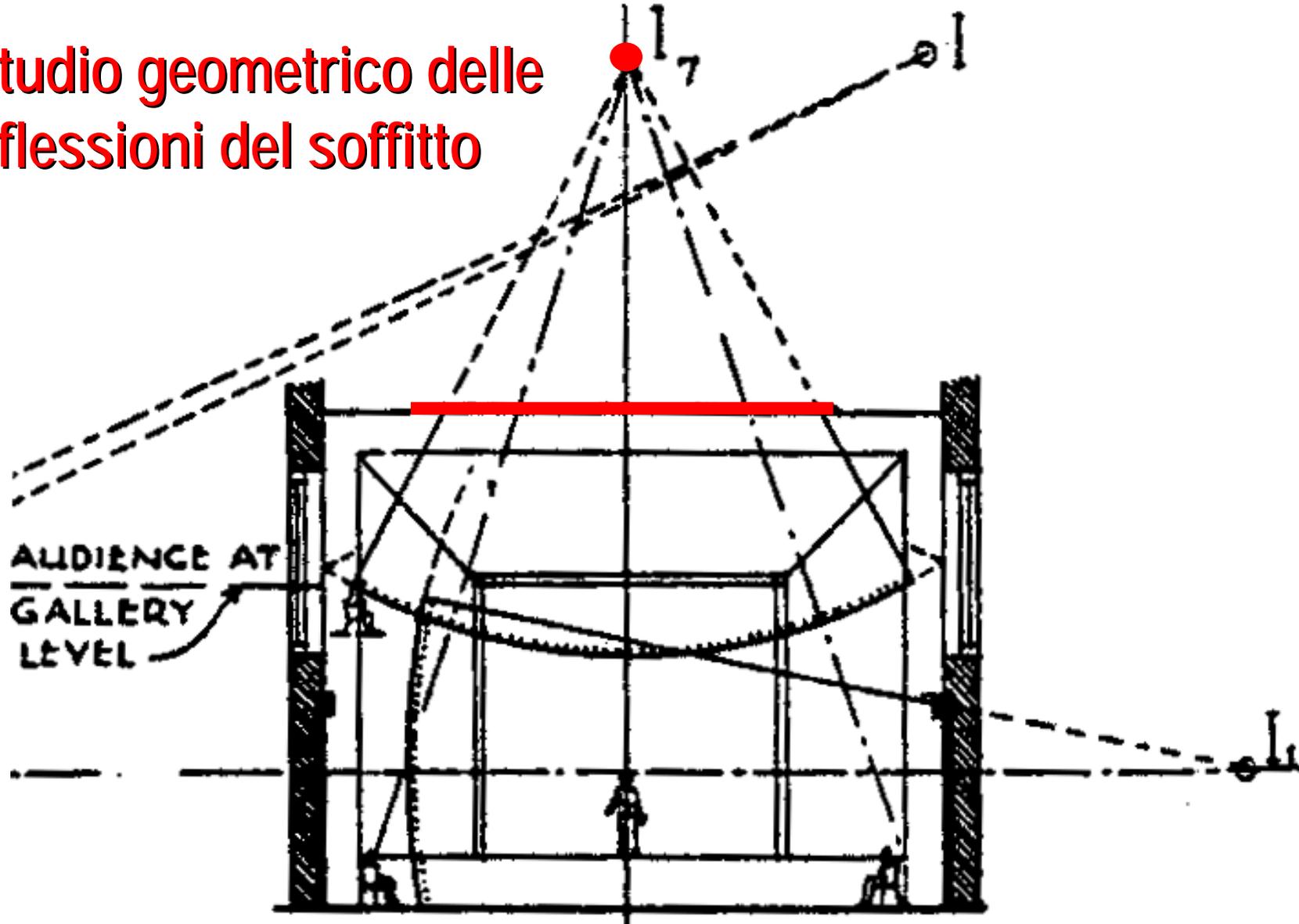


CRITERI ACUSTICI NELLA PROGETTAZIONE DELLE SALE

Le leggi della riflessione del suono



Studio geometrico delle riflessioni del soffitto

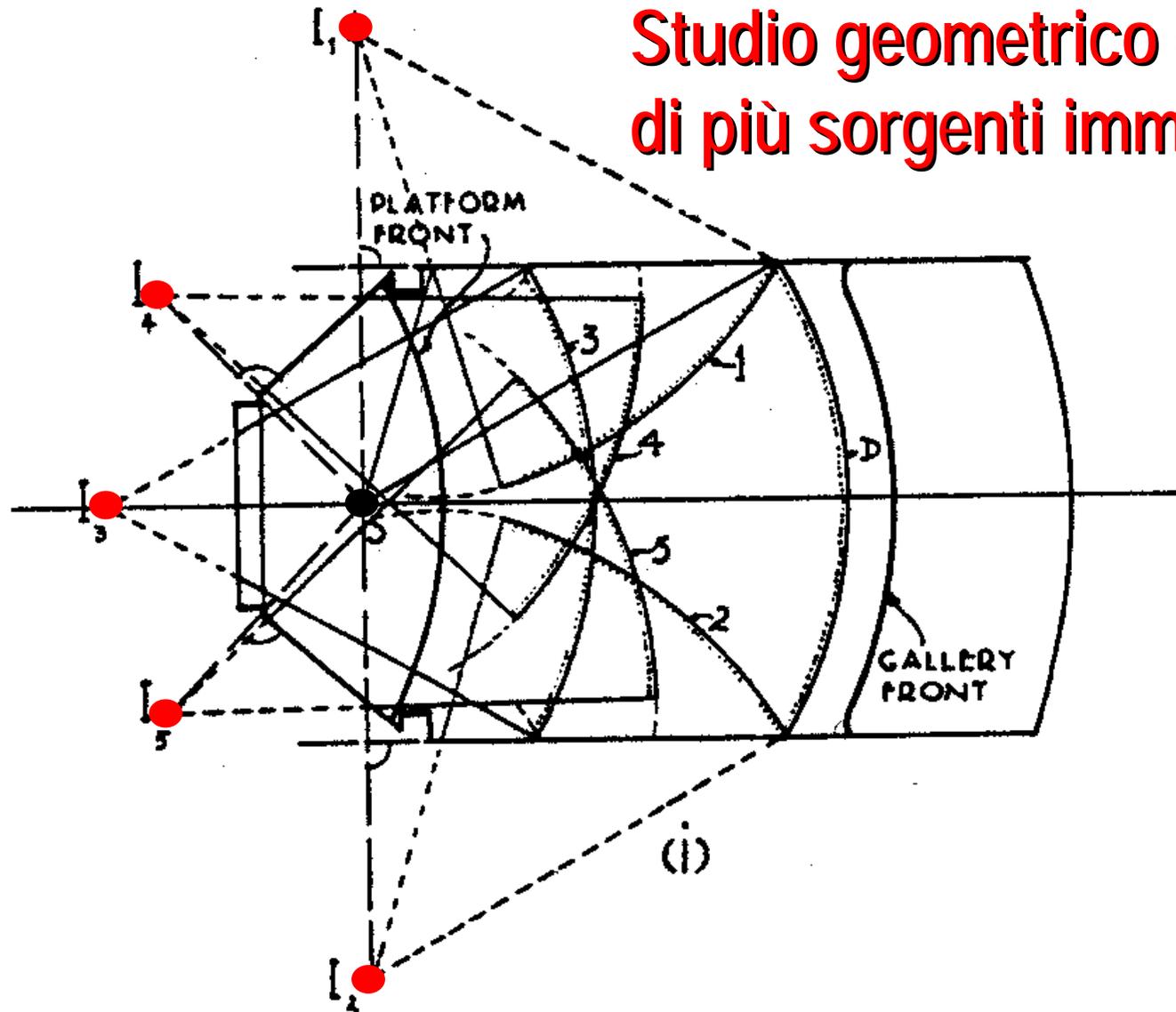


CRITERI ACUSTICI NELLA PROGETTAZIONE DELLE SALE

Le leggi della riflessione del suono

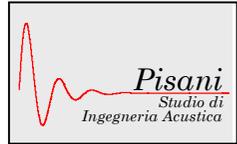


Studio geometrico con l'impiego di più sorgenti immagini

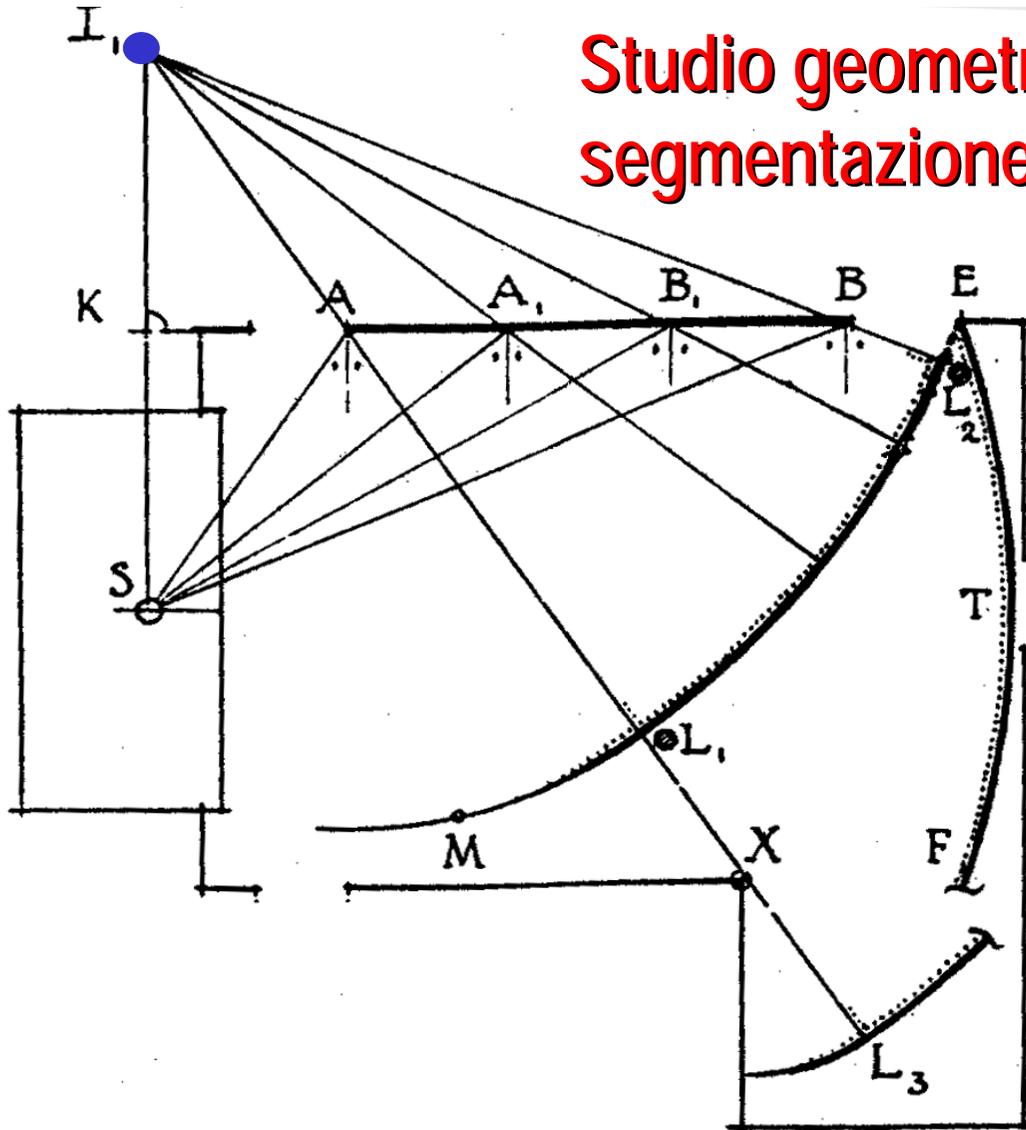


CRITERI ACUSTICI NELLA PROGETTAZIONE DELLE SALE

Le leggi della riflessione del suono



Studio geometrico con maggior segmentazione della superficie riflettente

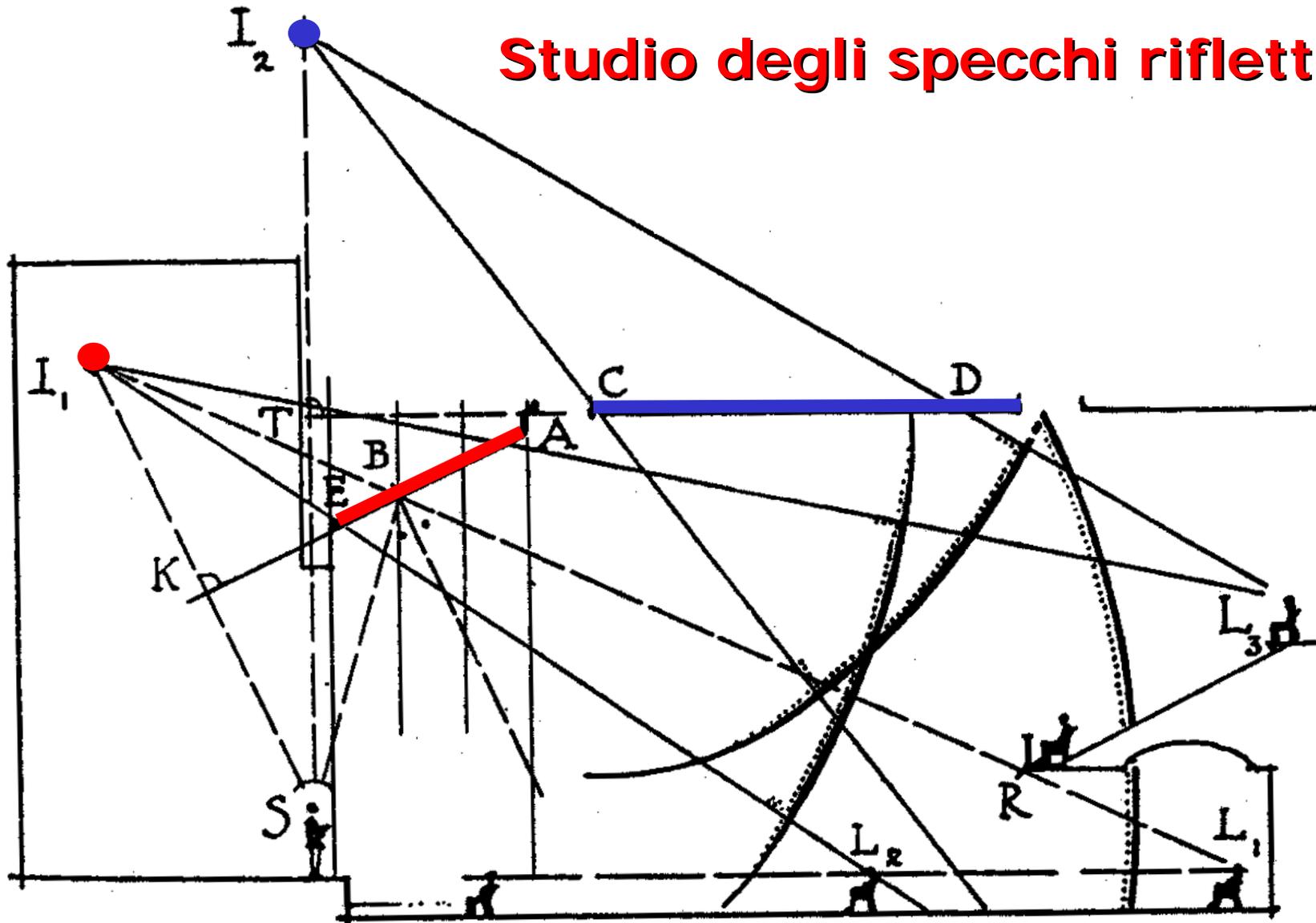


CRITERI ACUSTICI NELLA PROGETTAZIONE DELLE SALE

Le leggi della riflessione del suono

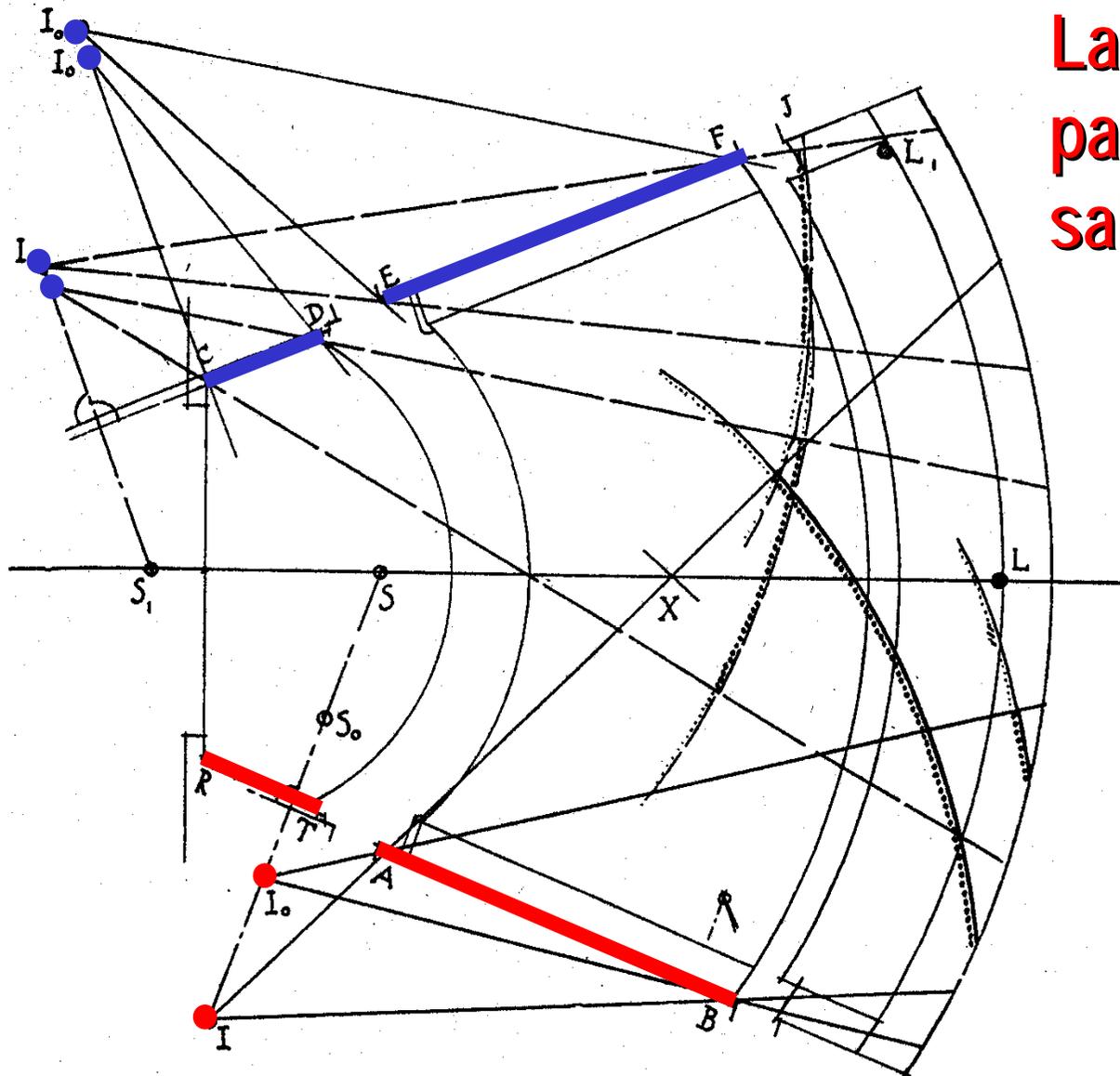


Studio degli specchi riflettenti



CRITERI ACUSTICI NELLA PROGETTAZIONE DELLE SALE

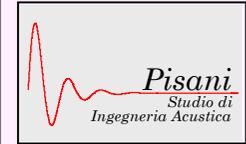
Le leggi della riflessione del suono



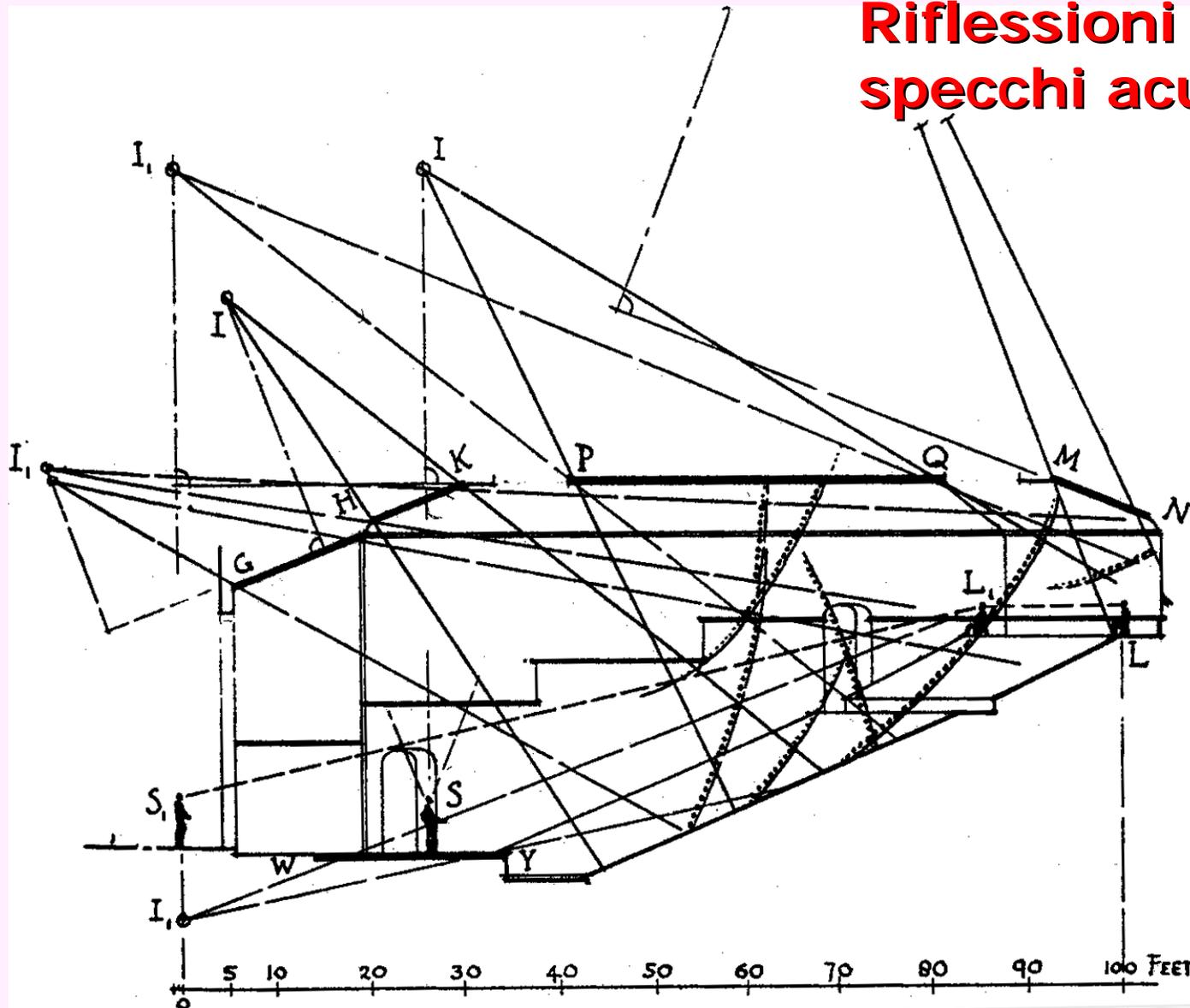
**La riflessione delle
pareti laterali di una
sala a ventaglio**

CRITERI ACUSTICI NELLA PROGETTAZIONE DELLE SALE

Le leggi della riflessione del suono



Riflessioni di molteplici specchi acustici

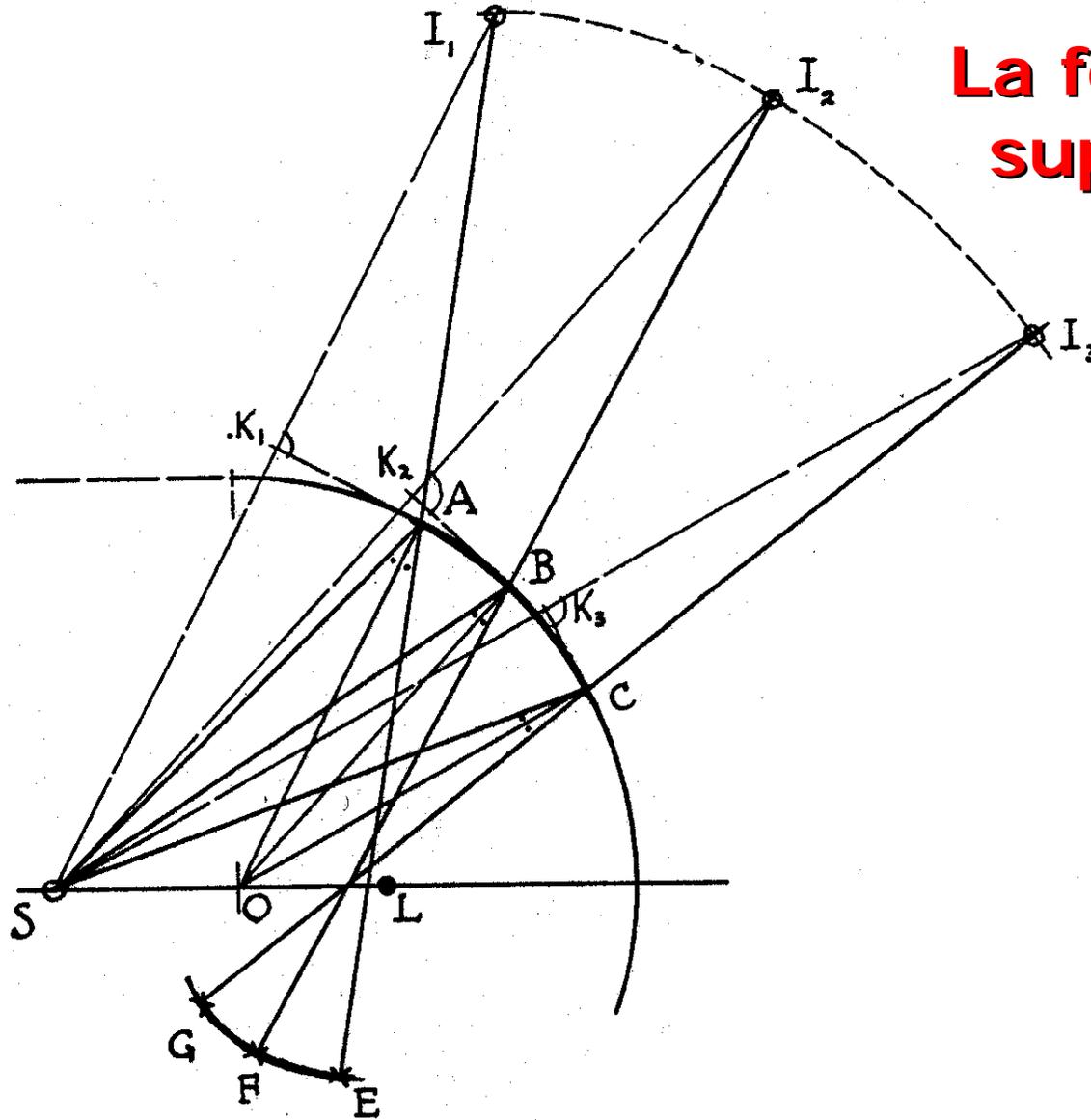


CRITERI ACUSTICI NELLA PROGETTAZIONE DELLE SALE

Le leggi della riflessione del suono

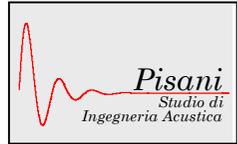


La focalizzazione di superfici concave

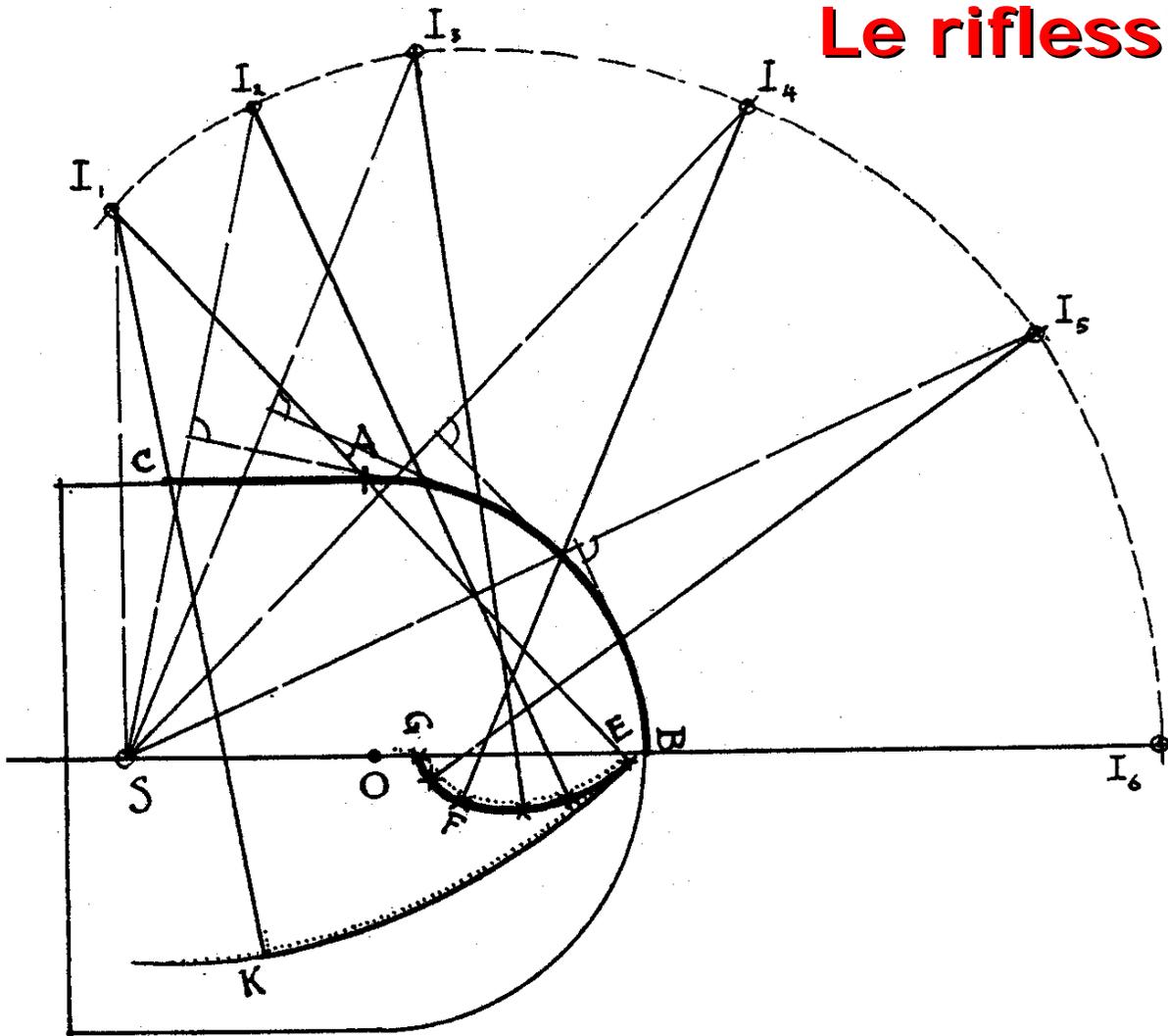


CRITERI ACUSTICI NELLA PROGETTAZIONE DELLE SALE

Le leggi della riflessione del suono



Le riflessioni dell' abside

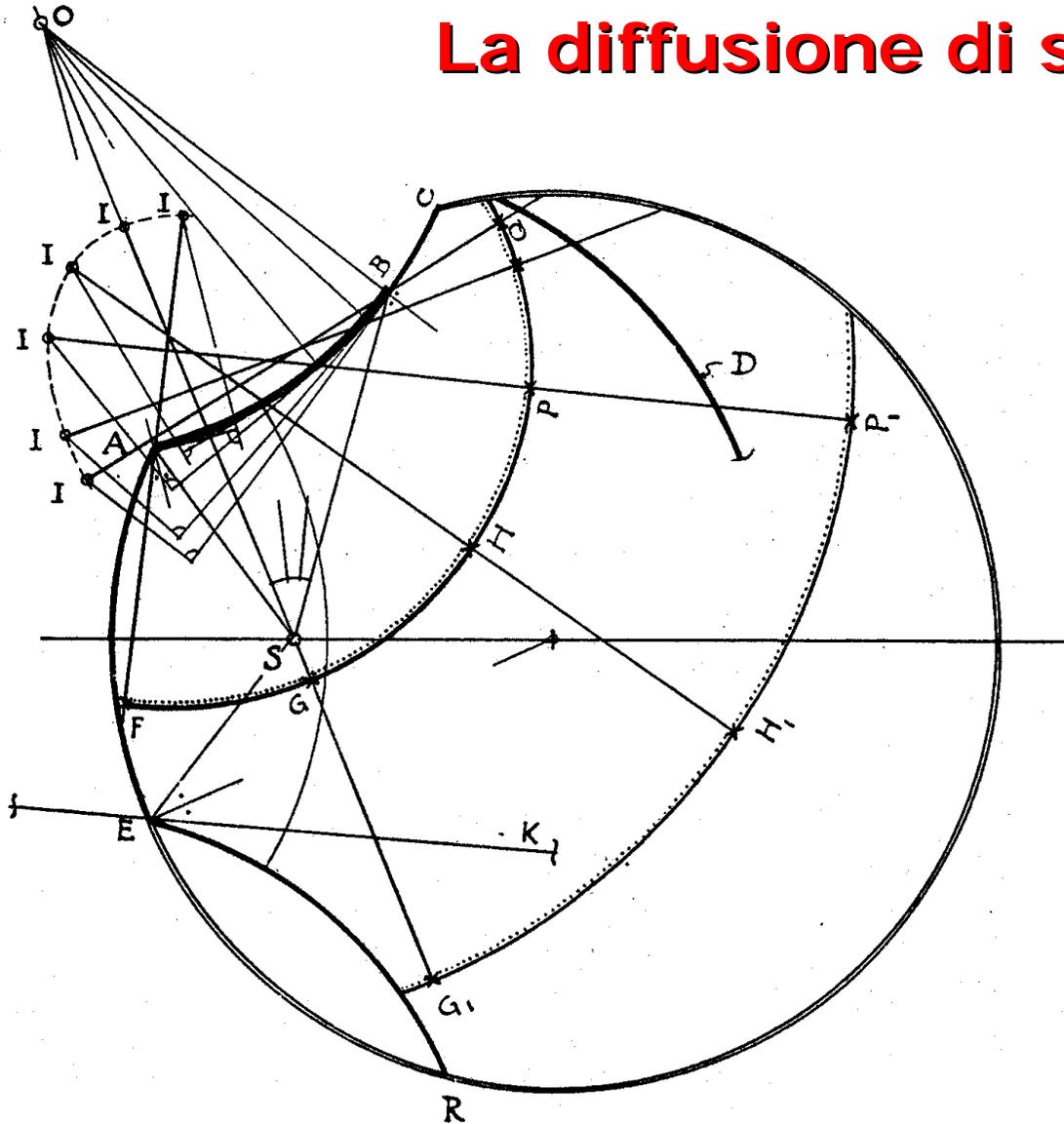


CRITERI ACUSTICI NELLA PROGETTAZIONE DELLE SALE

Le leggi della riflessione del suono

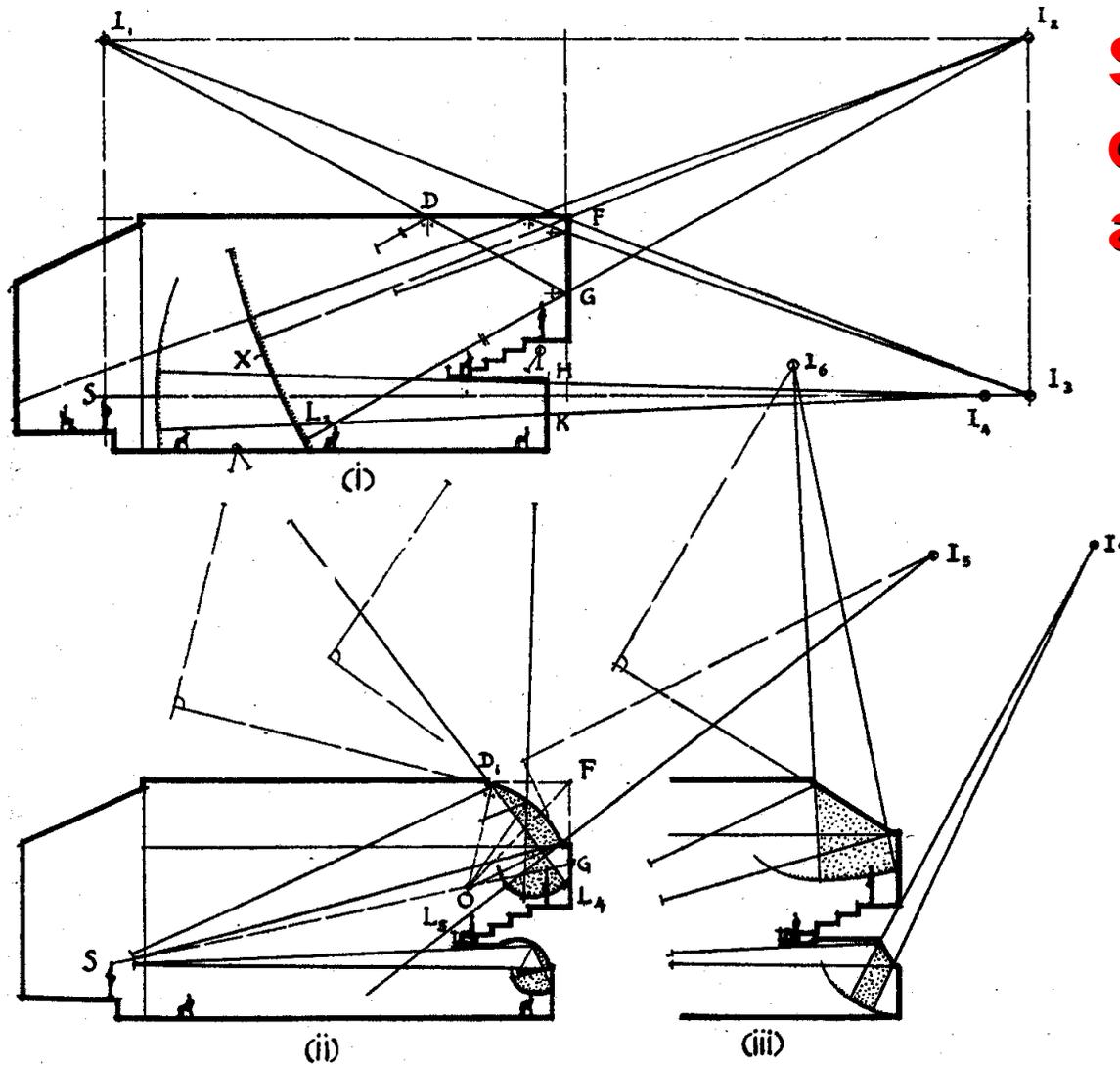
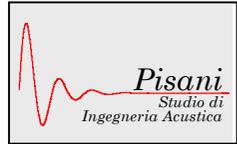


La diffusione di superfici convesse



CRITERI ACUSTICI NELLA PROGETTAZIONE DELLE SALE

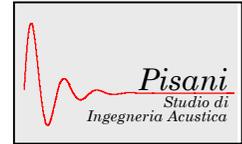
Le leggi della riflessione del suono



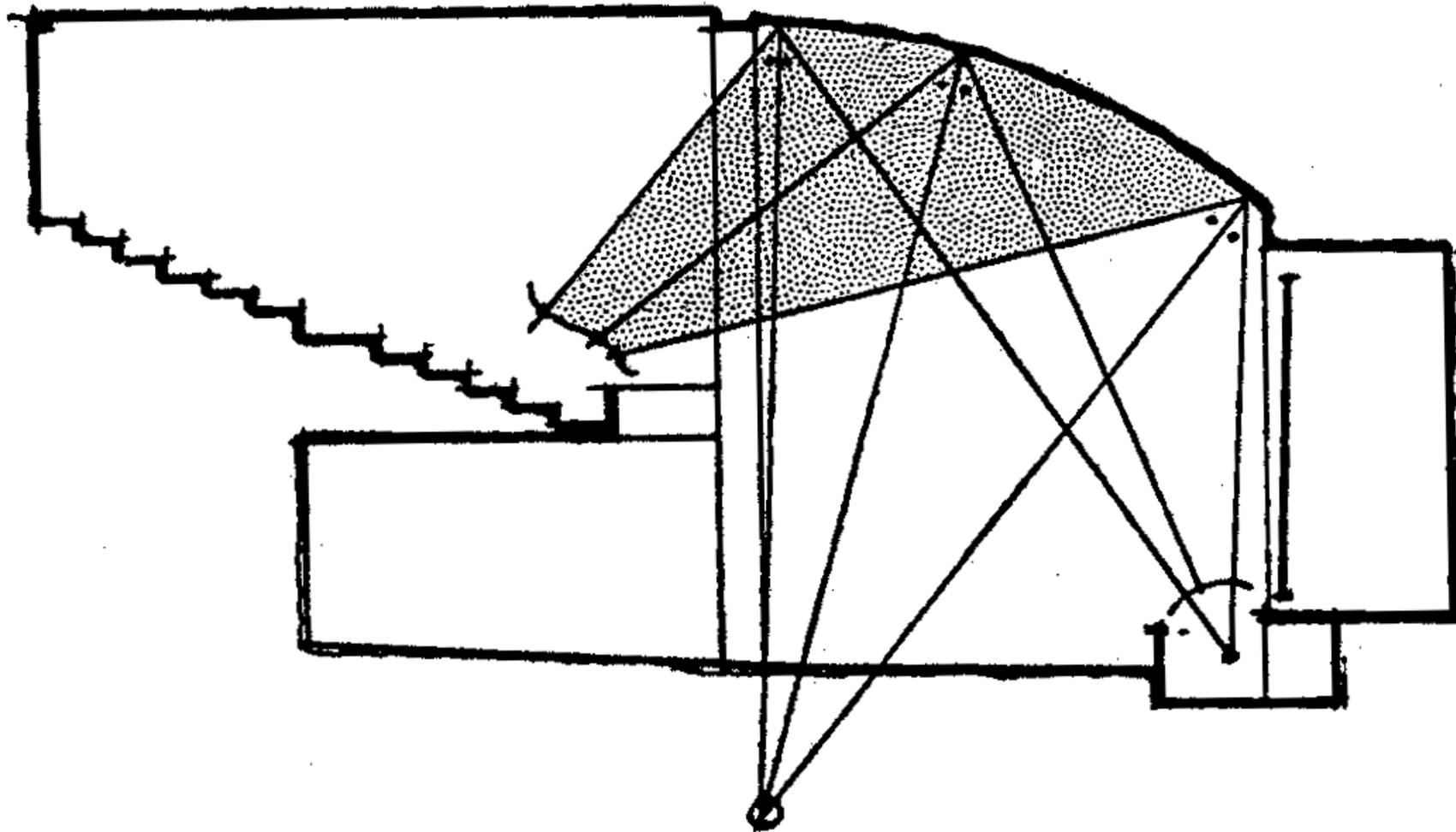
**Studi geometrici
di particolari
architettonici**

CRITERI ACUSTICI NELLA PROGETTAZIONE DELLE SALE

Le leggi della riflessione del suono



Esempio tipico di focalizzazione

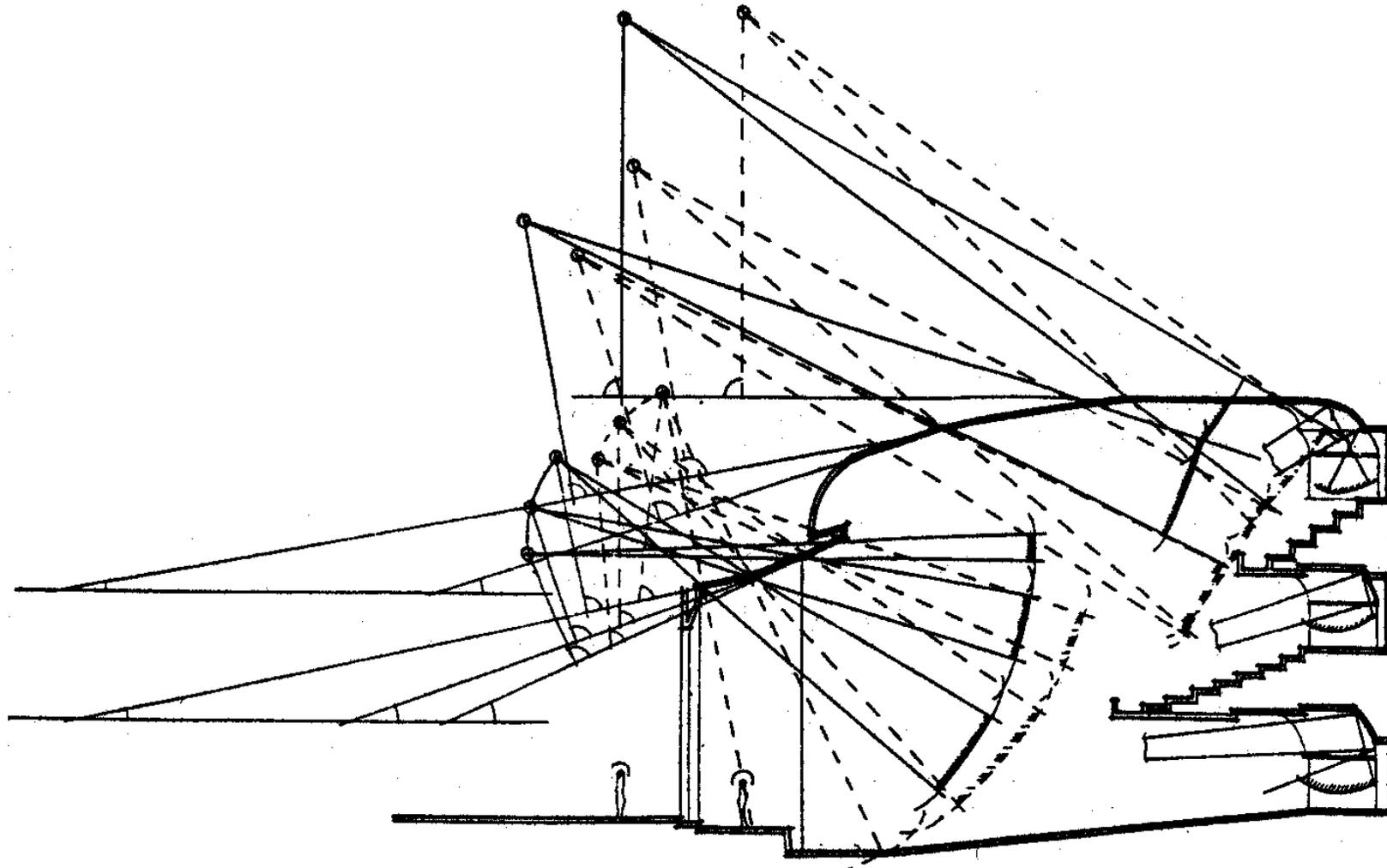


CRITERI ACUSTICI NELLA PROGETTAZIONE DELLE SALE

Le leggi della riflessione del suono



Le riflessioni degli specchi e le interazioni dei frondi d'onda con le gallerie

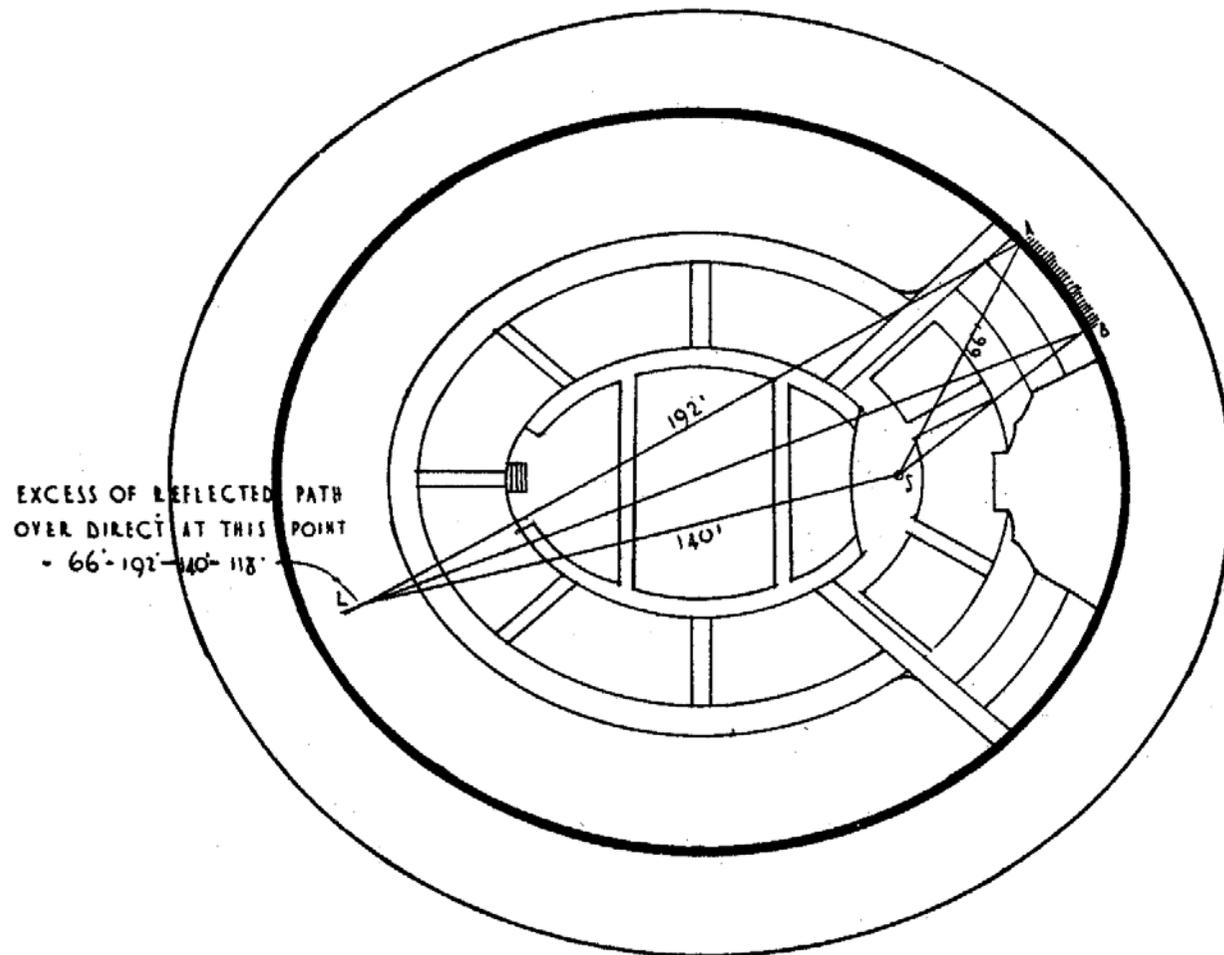


CRITERI ACUSTICI NELLA PROGETTAZIONE DELLE SALE

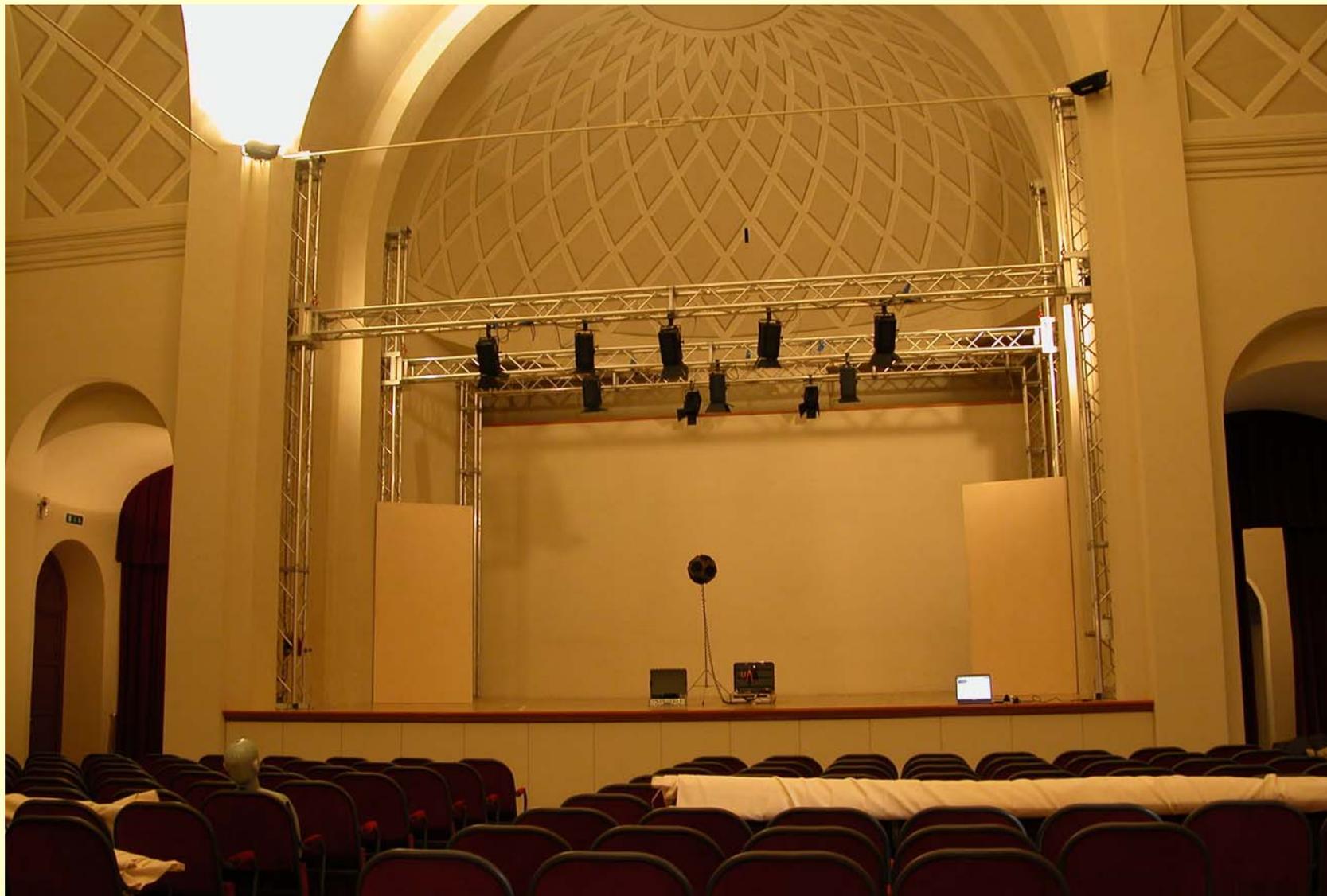
Le leggi della riflessione del suono



Esempio di piante ellittiche Royal Festival Hall di Londra



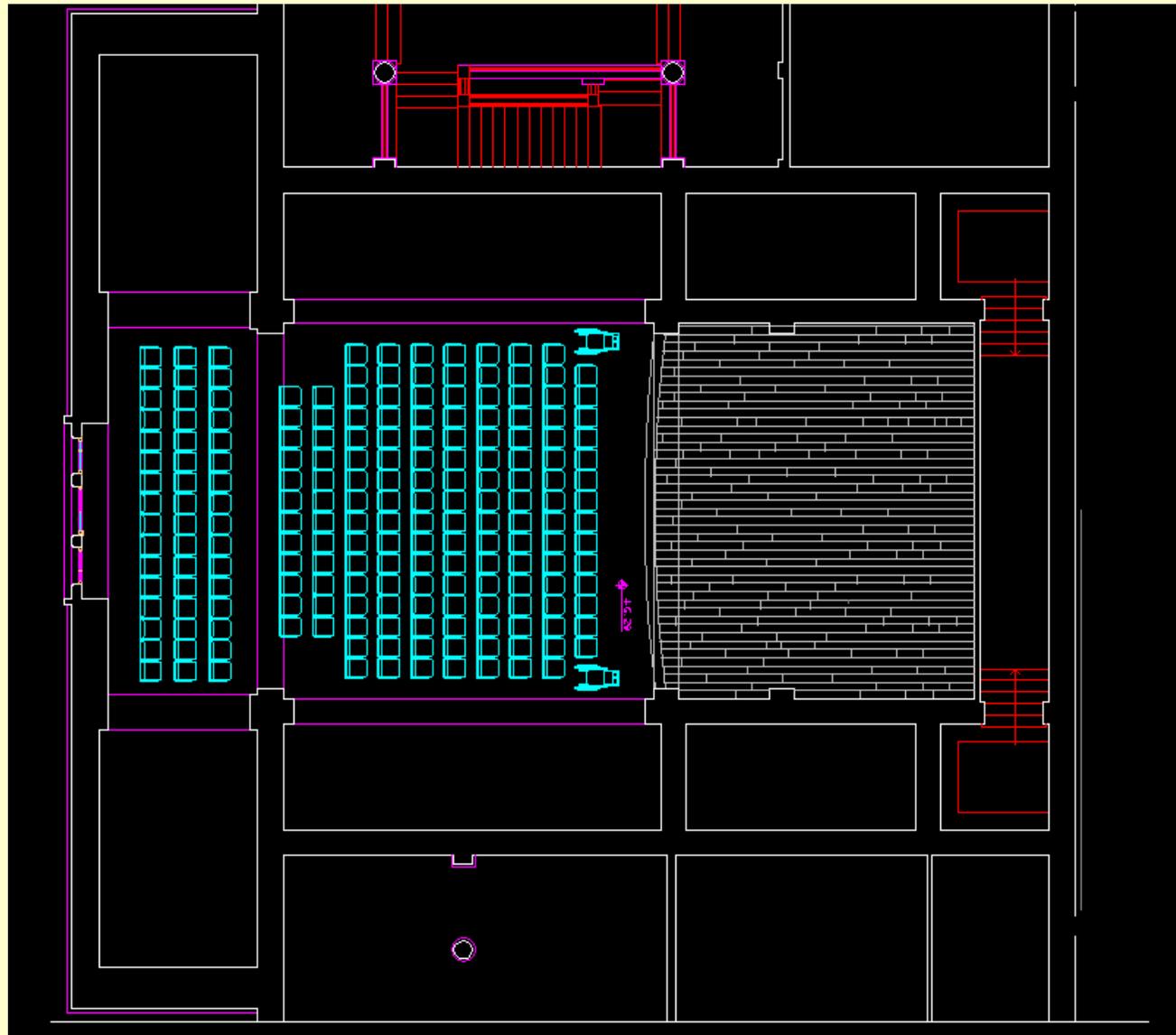
Correzione acustica con forme ed estetica vincolate



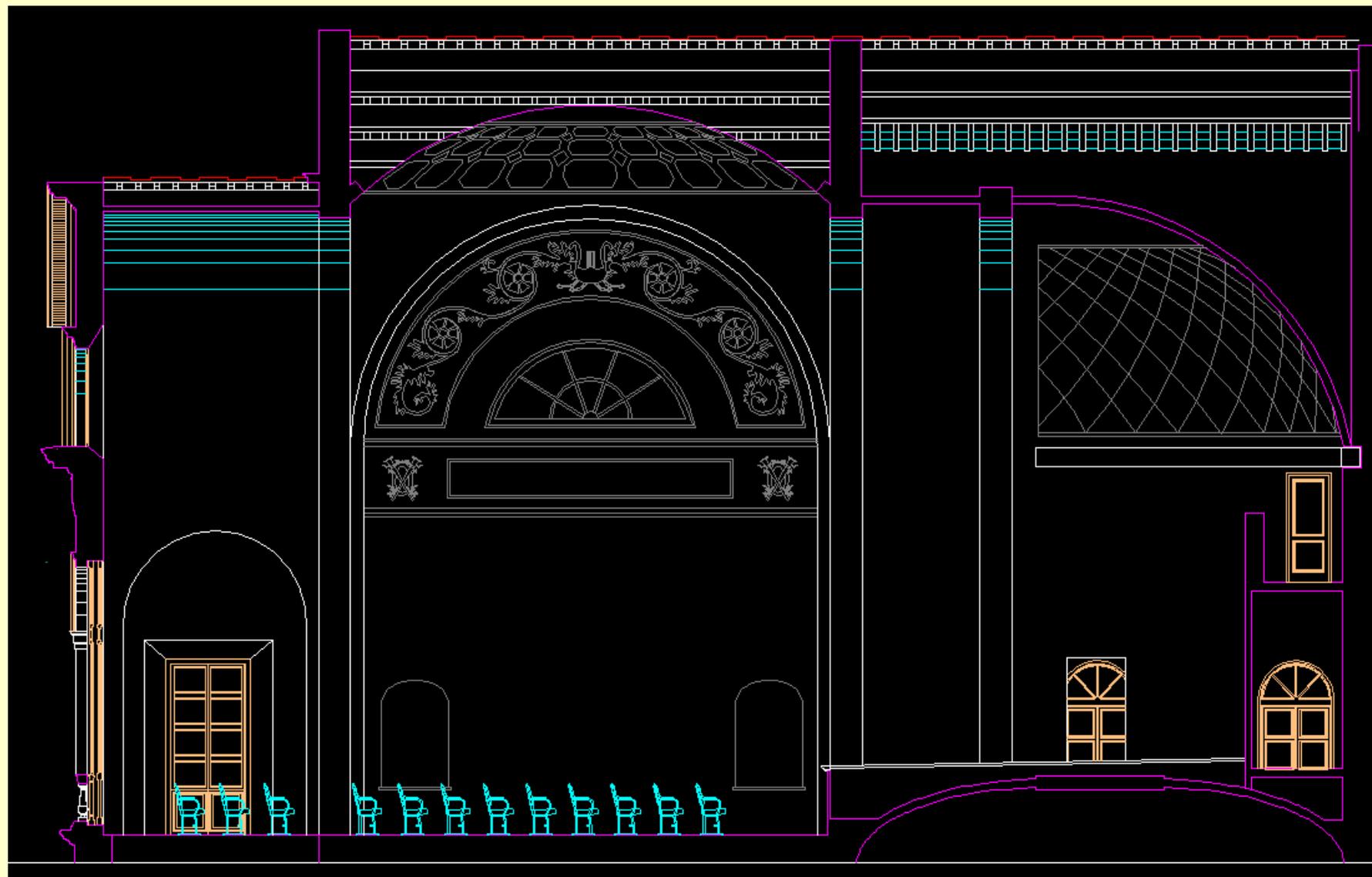
Correzione acustica con forme ed estetica vincolate



Sala Goldonetta di Livorno



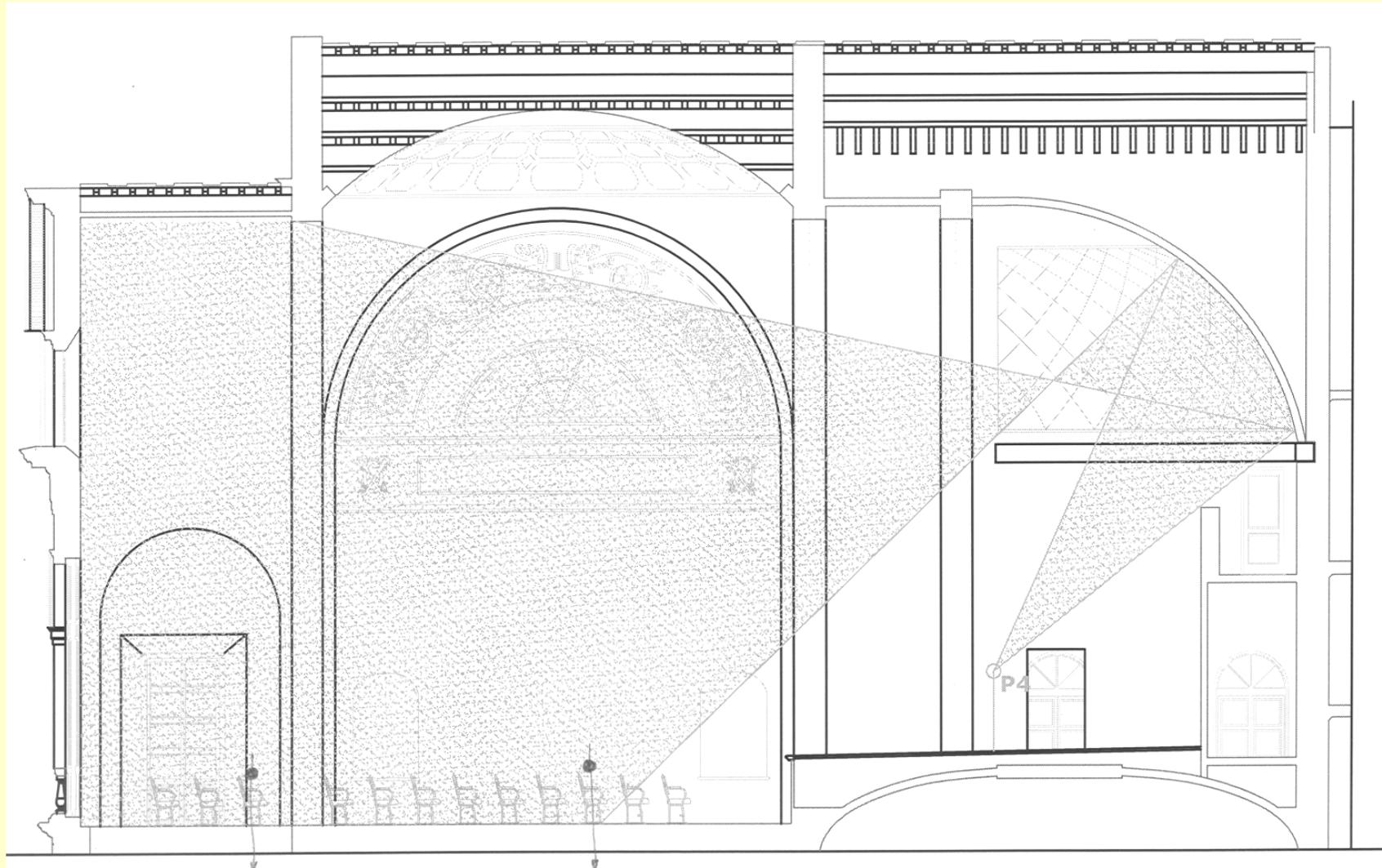
Sala Goldonetta di Livorno



Particolare delle volte



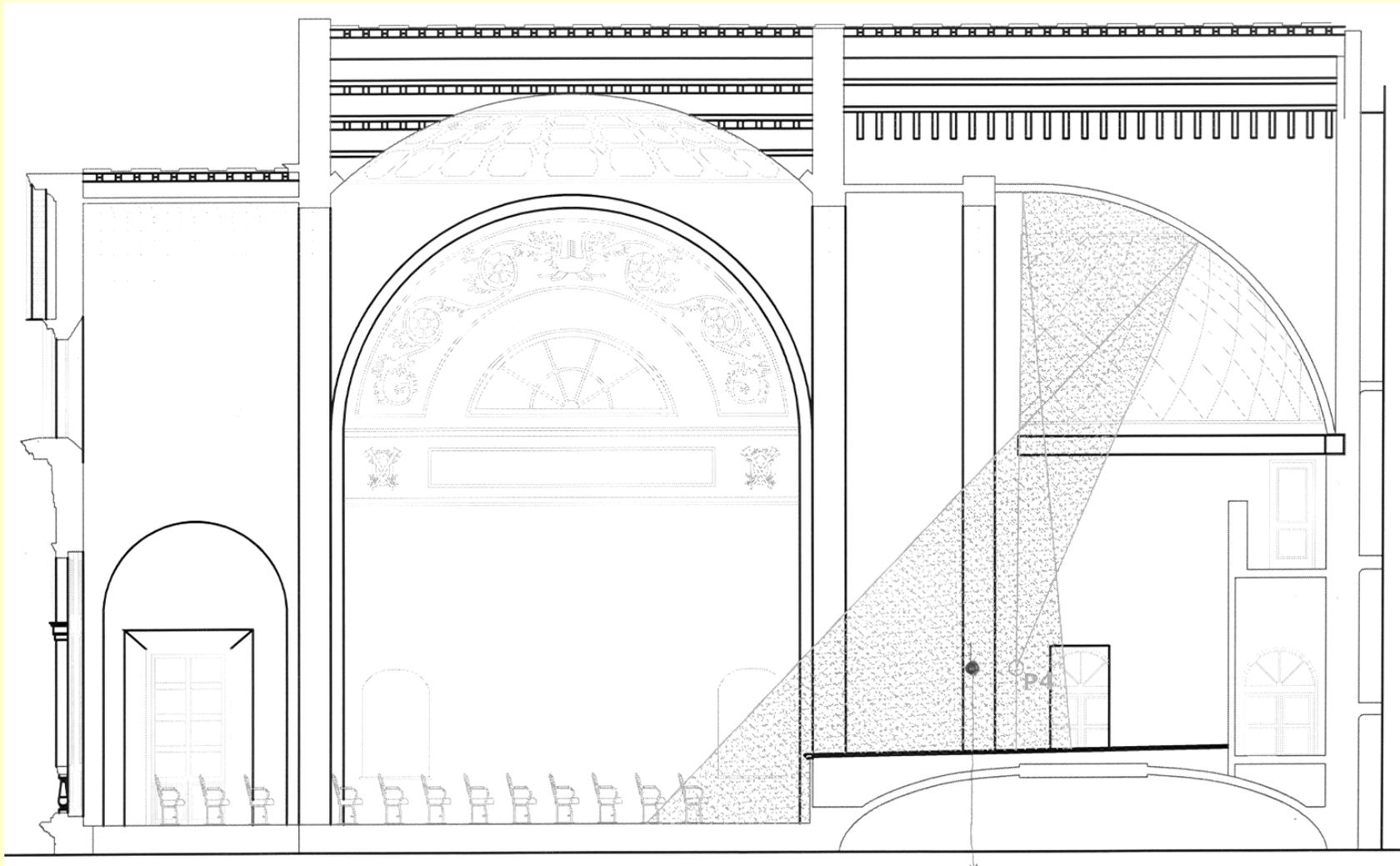
Studio delle riflessioni



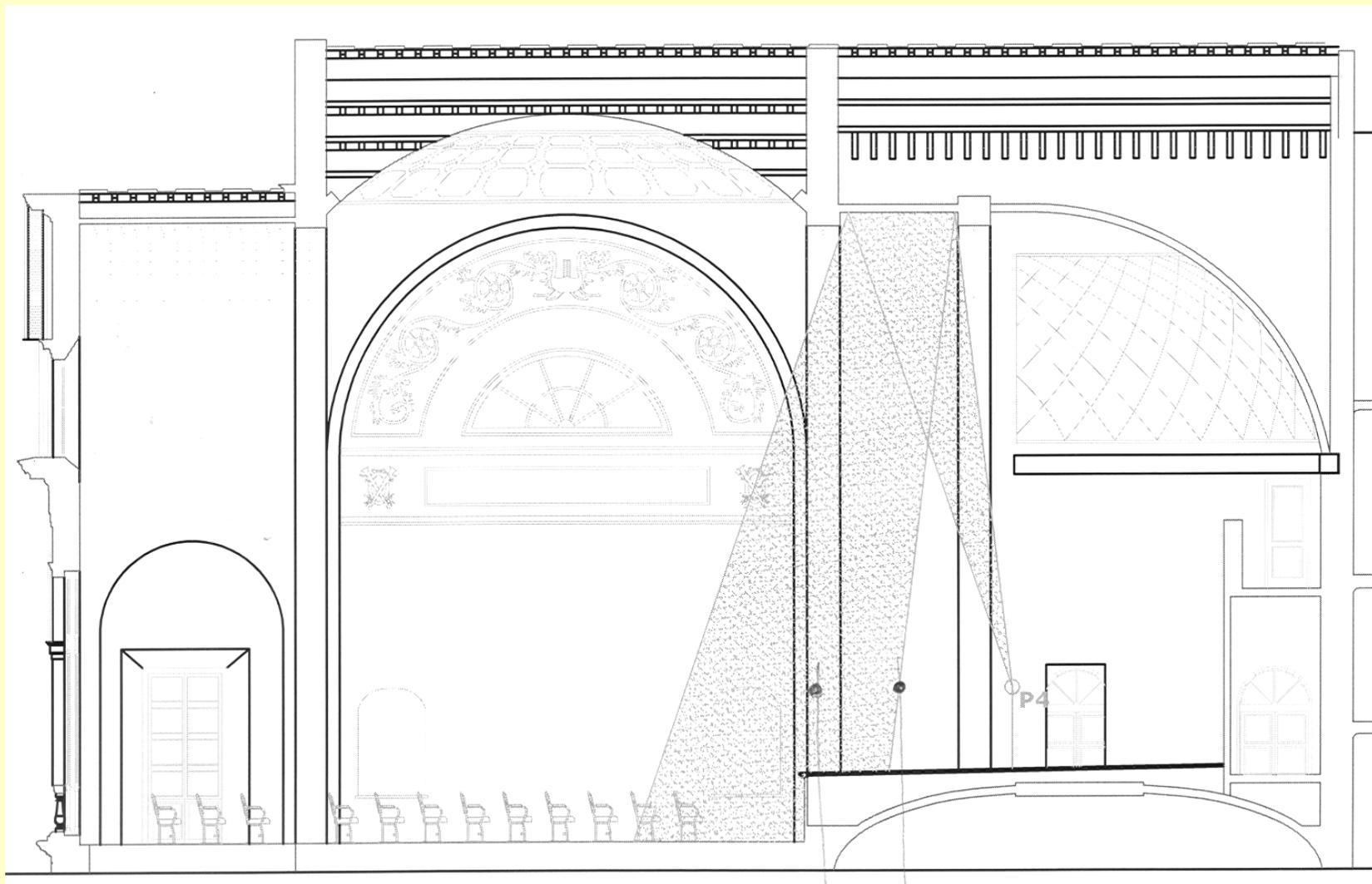
Colpo di pistola



Studio delle riflessioni



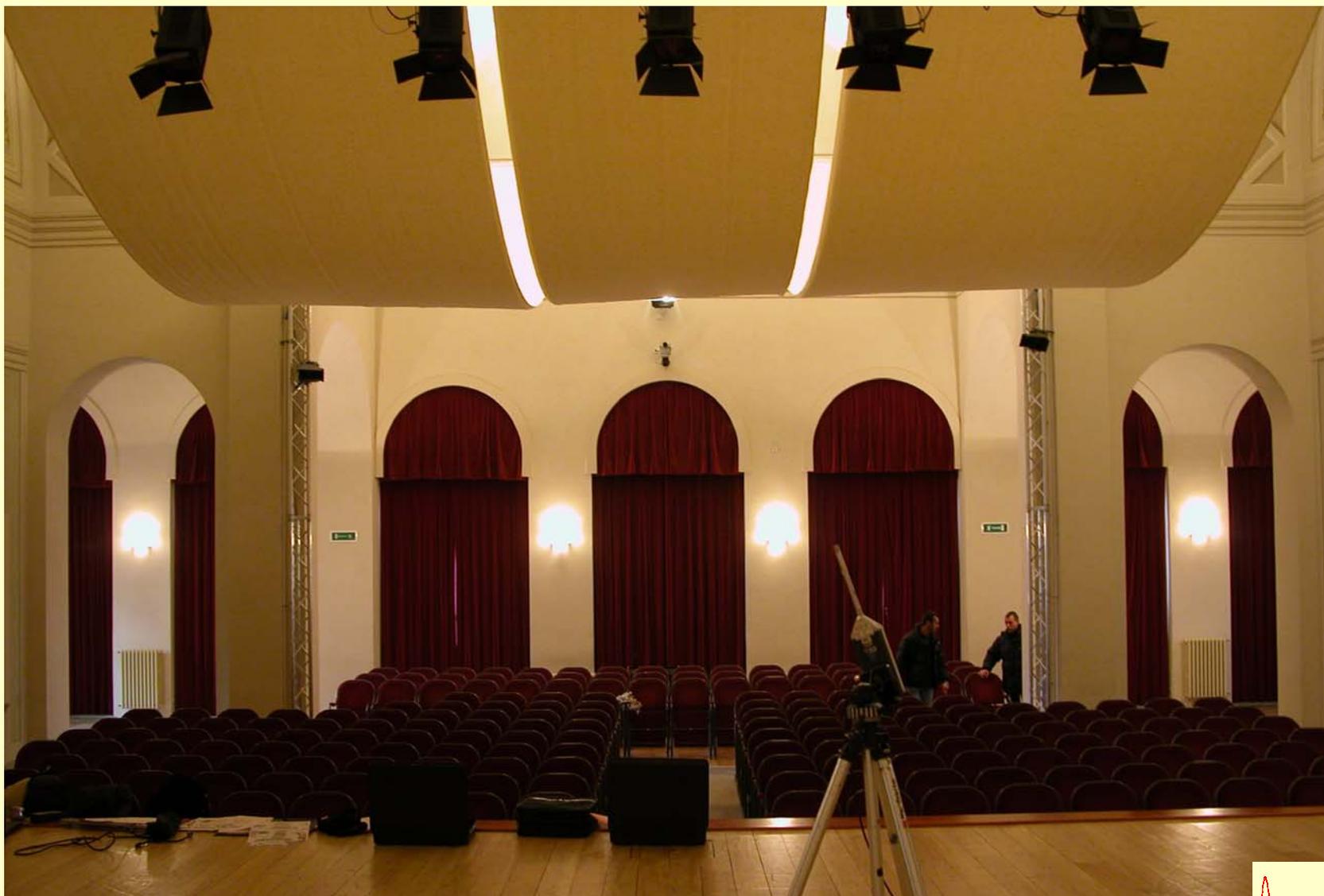
Studio delle riflessioni



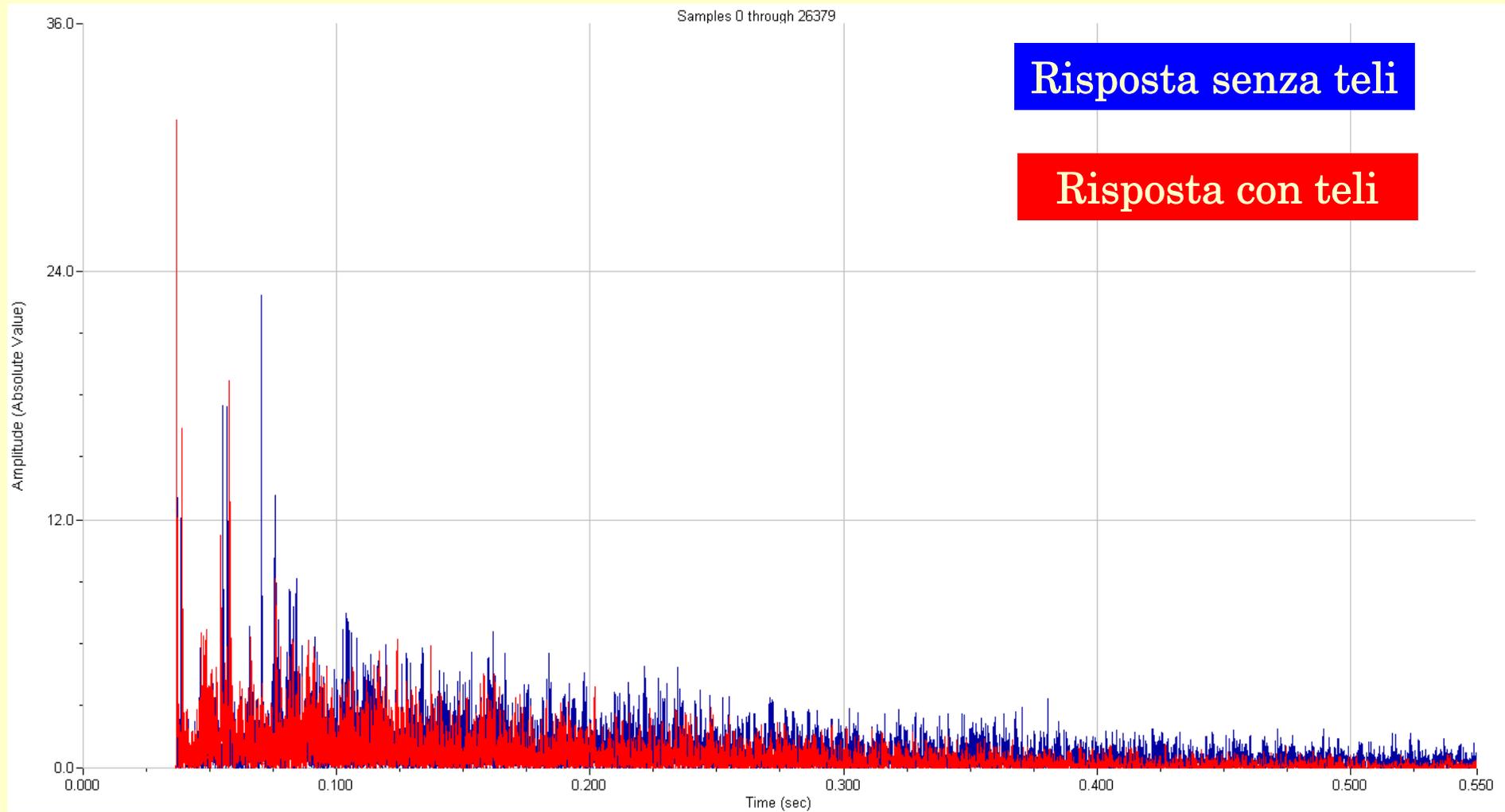
Claquette



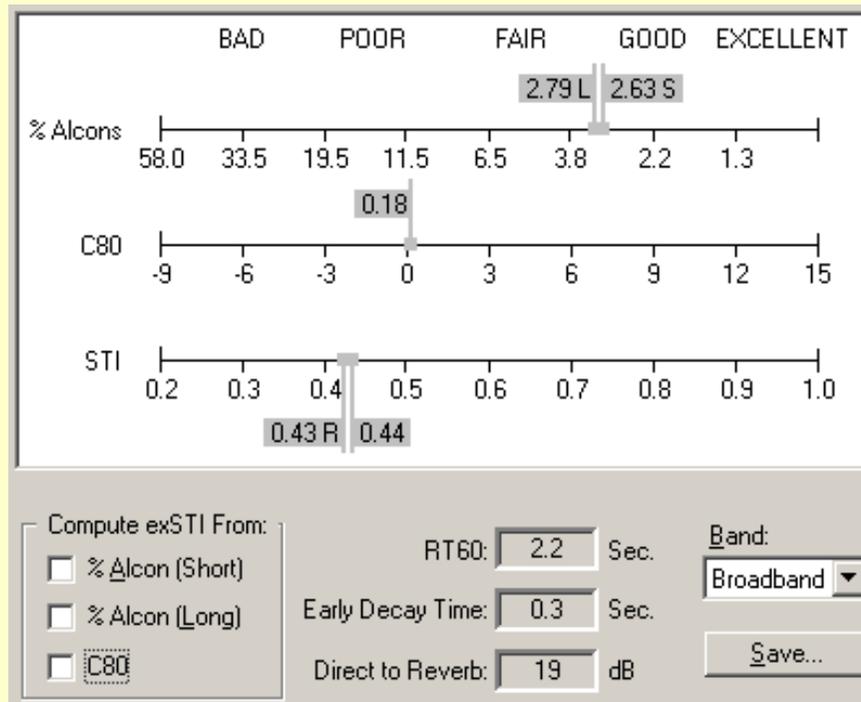
Correzione acustica con forme ed estetica vincolate. Posa di teli fonoassorbenti



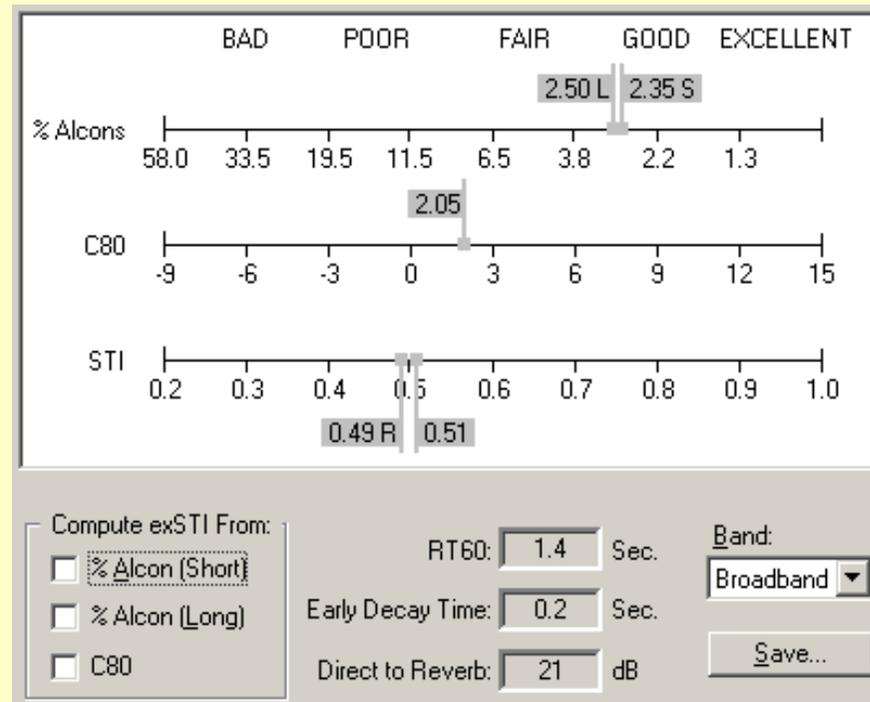
La risposta all'impulso



La risposta all'impulso



Misura a sala spoglia



Misura con teli fonoassorbenti appesi

