

Modulo M8, 4

La Progettazione Acustica delle Sale

Docente: Dott. Stefano De Stabile (DOCS SRL)

Informazioni sul Docente

Nome e Cognome

Stefano De Stabile

Titolo di Studio

Laurea in Fisica Teorica (vecchio ordinamento: 110/100 con lode)

Qualifiche professionali

Tecnico Competente in Acustica (n. ENTECA 5546 – RER/00503)

Vibration Analyst Level 2 ISO 18436 (certificate da Möbius Institute)

Tecnico qualificato per la valutazione degli impianti EVAC ai sensi della CEI
EN 60849 e UNI ISO 7240:19

Consulente acustico delle seguenti fondazioni musicali:

Ravenna Manifestazioni – Ravenna Festival

Orchestra giovanile Luigi Cherubini

Esperienze professionali

Socio fondatore di DOCS srl

Socio fondatore di Acoustec Ltd

Dirigente responsabile del settore SN&V per la multinazionale Bureau
Veritas SA

Libero professionista











Coordinate

sds@docs-snc.com

(+39) [REDACTED]

1 Premessa: quale Sala?

Il titolo di questo modulo “Progettazione Acustica delle Sale” è oggettivamente poco definito e quanto mai potenzialmente vasto; ciò è dovuto al fatto che il termine “Sala” può stare ad indicare un numero di ambienti chiusi molto ampio e assai differenziato potendo rientrare in questa definizione:

-  Sale da concerto
-  Auditorium
-  Teatri di prosa
-  Teatri d’opera
-  Sale conferenze
-  Aule magne
-  Sale cinematografiche
-  Sale di registrazione
-  Palazzi dello Sport e altre arene multimediali
-  ecc.

È evidente che una trattazione acustica, anche solo di massima, di tutte queste differenti tipologie di ambienti dedicati all’ascolto richiederebbe non un modulo, ma almeno un intero corso monotematico.

Per questo motivo ho ritenuto logico, ancorché pragmatico, limitare la trattazione tenendo conto di quelle che sono le esperienze di acustica architettonica che mediamente si presentano con maggior probabilità e frequenza nella carriera di un consulente acustico.

Ciò comporta il dover scartare i casi acusticamente più “nobili” delle sale da concerto e delle opera houses, in quanto la progettazione, nell’arco della propria carriera professionale, anche solo di una di queste tipologie di Sale, rappresenterebbe già un successo straordinario per un consulente acustico.

È invece assai più probabile che il consulente si imbatta nella progettazione di ambienti dedicati al “parlato”, ossia ambienti in cui l’evento acustico statisticamente prevalente è rappresentato dalla diffusione e ascolto di messaggi di tipo vocale; stiamo parlando di sale conferenze, auditorium, aule magne, piccoli teatri di prosa, ecc.

Nelle 4 ore a nostra disposizione il riuscire ad introdurre, descrivere e spiegare i criteri fondamentali che non tanto presiedono ad una progettazione acustica corretta, ma perlomeno consentono di riconoscere e quindi evitare gli errori progettuali più gravi (e anche più comuni) rappresenta un obiettivo non facile e comunque sicuramente sufficiente per la formazione del tecnico competente in acustica.

L’eventuale approfondimento del campo dell’acustica che presiede allo studio, all’analisi e alla progettazione di tutti gli altri spazi precedentemente elencati – e che va sotto il nome di “Acustica Architettonica” – dovrà essere affrontato dal consulente nell’ambito di un eventuale successivo percorso di specializzazione.

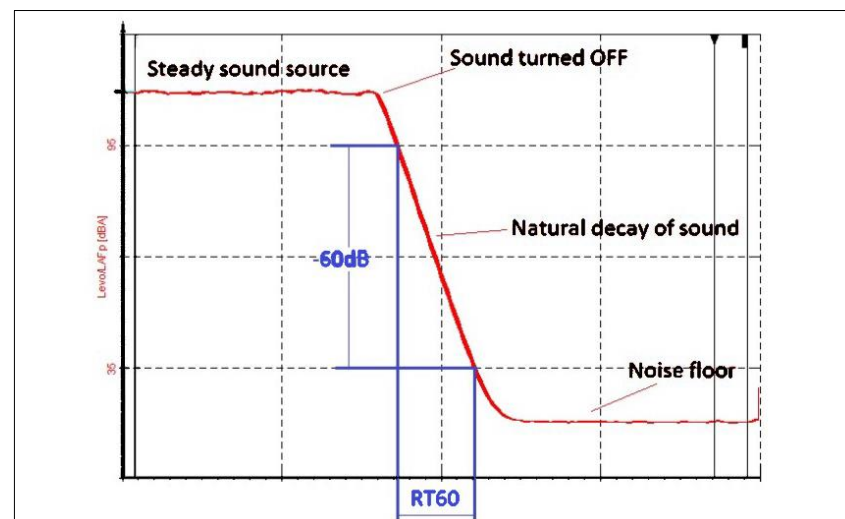
2 Richiami di Acustica degli Ambienti Chiusi

In questo capitolo richiameremo due descrittori acustici fondamentali, descrittori che, a quanto mi risulta, sono già stati approfonditamente trattati nei moduli precedenti, ma che necessitano di un richiamo in quanto intimamente legati alla qualità acustica di una sala per il parlato: il tempo di riverbero e l'intelligibilità.

2.1 Tempo di Riverbero

Il tempo di riverbero è un parametro che si misura in secondi e che fornisce un'indicazione chiara di quale sia il decadimento temporale dell'energia acustica all'interno di un determinato ambiente.

Il grafico a fianco mostra il significato fisico del tempo di riverbero: data la presenza, all'interno dell'ambiente, di una sorgente stazionaria di rumore, se al tempo t_0 la sorgente viene istantaneamente spenta il Tempo di Riverbero (normalmente indicato con RT oppure RT60 o anche T60) è il tempo necessario perché il livello sonoro misurato in un determinato punto si riduca di 60 dB rispetto al valore iniziale.



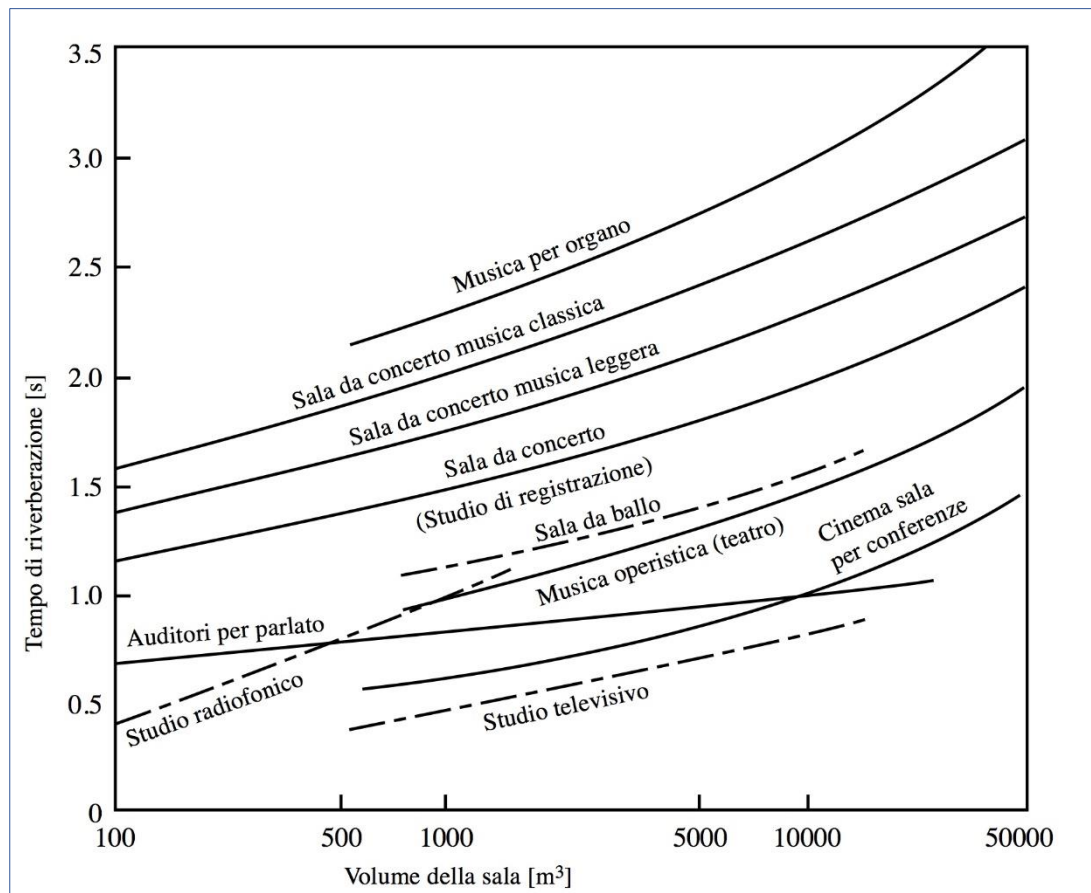
Nella realtà, per effetto della presenza in tutti gli ambienti di un determinato rumore di fondo, non si riesce quasi mai a misurare un decadimento di 60 dB nel livello sonoro, ragion per cui ci si limita a misurare il tempo necessario per rilevare un decadimento sonoro di 20 (T20) o 30 dB (T30) e, nell'ipotesi di campo diffuso, a moltiplicare il risultato rispettivamente per 3 o per 2 onde ottenere un valore congruo a T60.

NOTA IMPORTANTE

Sia i software di misura che quelli di simulazione quando restituiscono i valori di T20 e di T30 lo fanno avendoli già moltiplicati rispettivamente per 3 o per 2; in altri termini tali valori sono già congrui a T60 e non vanno mai moltiplicati per i rispetti fattori!

Tutte le formule precedenti evidenziano come il Tempo di Riverbero dipenda sia dalla geometria che dalle proprietà acustiche (segnatamente dal coefficiente di assorbimento) dei materiali che rivestono le superfici dell'ambiente; quest'ultima dipendenza si traduce nel fatto che il Tempo di Riverbero è un parametro che può assumere valori diversi alle varie frequenze (ossia, RT è funzione di f). Relativamente poi alla sua variabilità spaziale, negli ambienti reali, dove il campo acustico non è mai né omogeneo né isotropo, RT non è costante, ma varia in funzione della posizione in cui lo si valuta.

Oltre a queste variabilità, è opportuno ricordare che non esiste un valore ottimale di RT, ma vi sono intervalli di qualità entro i quali RT dovrebbe collocarsi, intervalli che variano in funzione della dimensione dell'ambiente e della tipologia di evento o rappresentazione che vi si svolge. Nella figura seguente mostriamo uno dei tanti grafici reperibili nella letteratura di settore che riporta gli intervalli ottimali di RT in funzione della volumetria della sala e del tipo di evento sonoro.



Ciò che emerge in modo netto è che per gli ambienti destinati alla riproduzione e comprensione della parola è necessario che RT si attesti su valori oggettivamente modesti.

Data una sala è possibile stimarne il valore di RT alle varie frequenze: esistono infatti numerose formule empiriche che consentono, note le caratteristiche geometriche (dimensioni, superficie, volume) e acustiche (coefficienti di assorbimento) dell'ambiente, di effettuare un calcolo previsionale del tempo di riverbero.

Ognuna di queste formule si caratterizza per specifiche ipotesi che presiedono alla loro deduzione e tali ipotesi a loro volta si riflettono in ben precisi limiti di validità delle formule stesse; nel prospetto alla pagina successiva riportiamo le formule più note ancorché più semplici, evidenziandone sinteticamente campi e limiti di applicabilità.

Ovviamente quando la complessità e le dimensioni della sala aumentano non è più possibile utilizzare queste formule semplificate (e comunque approssimate), ma risulta necessario ricorrere a software di simulazione acustica. Tali software prevedono la costruzione di un modello 3D dell'ambiente e la successiva assegnazione dei materiali (scelti all'interno di vasti database in dotazione ai software stessi) alle superfici e agli oggetti/arredi presenti; conclusa questa fase si procede al lancio di simulazioni numeriche che, quando l'ordine delle riflessioni cresce, si basano tutti su algoritmi di ray-tracing o loro varianti; tralasciando gli aspetti specifici riguardanti la "taratura" del modello simulato, è possibile affermare che, se condotte con cura e perizia, le simulazioni acustiche ottenute mediante l'uso di software qualificati sono sicuramente attendibili nel limite della cosiddetta "acustica geometrica", quando cioè i fenomeni ondulatori sono trascurabili (sostanzialmente da 200 Hz in su).

Prospetto A

Autore	Formula	Campo di applicabilità e limiti
Sabine	$RT = \frac{0,161 \cdot V}{\sum_k S_k \cdot \alpha_k + 4 \cdot m \cdot V}$ <p>Dove</p> <p>RT: tempo di riverbero in secondi V: Volume dell'ambiente, in m³ S_k: area della k-esima superficie, in m² α_k: coefficiente di assorbimento acustico del materiale della k-esima superficie m: coefficiente di assorbimento dell'aria</p>	<p>La formula è ragionevolmente attendibile nel caso di ambienti "vivaci", ovvero caratterizzati da materiali con coefficienti di assorbimento "piccoli" (indicativamente per α < 0.2). Per α grandi la formula non è valida e al limite per α → 1 conduce ad un risultato fisico privo di senso.</p>
Eyring/ Millington-Sette	$RT = \frac{0,161 \cdot V}{-\sum_k S_k \cdot \ln(1 - \alpha_k) + 4 \cdot m \cdot V}$ <p>dove le lettere e i simboli hanno il medesimo significato del caso precedente</p>	<p>La formula converge a quella di Sabine nel limite di α piccoli, ma risulta ragionevolmente attendibile anche per valori grandi di α</p>
Fitzroy	$RT = 0,161 \cdot \frac{V}{S} \cdot \left[\frac{S_x}{S} \cdot \frac{1}{\ln(1 - \alpha_x)} + \frac{S_y}{S} \cdot \frac{1}{\ln(1 - \alpha_y)} + \frac{S_z}{S} \cdot \frac{1}{\ln(1 - \alpha_z)} \right]$ <p>dove, oltre ai simboli noti già introdotti in precedenza, si ha</p> <p>S_x: Superficie delle pareti parallele presenti lungo l'asse x S_y: Superficie delle pareti parallele presenti lungo l'asse y S_z: Superficie delle pareti parallele presenti lungo l'asse z α_x: coefficiente medio di assorbimento delle pareti presenti lungo l'asse x α_y: coefficiente medio di assorbimento delle pareti presenti lungo l'asse y α_z: coefficiente medio di assorbimento delle pareti presenti lungo l'asse z</p>	<p>La formula si applica solo ad ambienti rettangolari e tiene conto anche degli aspetti geometrici dell'ambiente ed in particolare dei modi di oscillazione (longitudinali, trasversali e verticali) che si innescano tra le superfici parallele disposte lungo i tre assi x, y e z.</p>

2.2 Intelligibilità

Prima di parlare di addentrarci nell'argomento occorre chiarirsi sul significato del termine "intelligibilità": dire che un discorso è intelligibile non implica affatto che esso sia comprensibile.

L'intelligibilità riguarda solamente la capacità di percepire uditivamente in modo corretto e privo di distorsioni i fonemi, le sillabe, le parole che vengono pronunciate; la comprensibilità invece dipende dal patrimonio intellettuale, culturale e professionale dell'ascoltatore e dell'oratore. In altre parole, se l'intelligibilità è elevata significa che chiunque può "udire" correttamente tutte le parole che vengono pronunciate in un seminario di fisica quantistica; ciò nonostante saranno comunque pochi quelli in grado di "comprendere" il significato di quanto enunciato.

Diversi sono i fattori che influenzano l'intelligibilità del parlato, tra questi i due più importanti sono:

Il livello del Rumore di Fondo.

Come regola generale, l'intelligibilità è inversamente proporzionale al livello del rumore di fondo (o più precisamente al rapporto segnale/rumore, S/N), ossia se il rumore aumenta l'intelligibilità diminuisce.

Il Tempo di Riverbero.

Come per il rumore di fondo, un eccesso di riverbero interferisce negativamente con l'intelligibilità del parlato; se RT aumenta, l'intelligibilità diminuisce.

Si presentano ora due domande cruciali:

È possibile **misurare** l'intelligibilità? E se sì, come?

La risposta alla prima domanda è sicuramente affermativa; per quanto riguarda la seconda domanda ci troviamo invece di fronte ad uno scenario complesso in quanto i vari descrittori deputati a misurare l'intelligibilità non sono caratterizzati dal medesimo grado di attendibilità, ma risultano invece dipendere da vari fattori quale, ad esempio, il ceppo linguistico: per le lingue tonali (ad es. il cinese) certi descrittori sono infatti poco adatti a misurare la reale intelligibilità di un messaggio vocale. Dal punto di vista generale per misurare l'intelligibilità esistono due metodi distinti: il metodo SOGGETTIVO e il metodo OGGETTIVO.

Senza entrare nel dettaglio tecnico, in quanto oltre lo scopo del presente corso, diciamo che, in genere, il metodo più attendibile per misurare l'intelligibilità è quello SOGGETTIVO, ossia quello che chiama in causa un numero rilevante di soggetti normoudenti che ascoltano una serie (standardizzata) di fonemi (monosillabi, bisillabi, parole in rima, parole prive di senso, ecc.) e scrivono su un foglio "cosa" hanno effettivamente compreso: in questo modo è il destinatario finale (cioè l'ascoltatore) del messaggio vocale che stabilisce cosa effettivamente ha udito e compreso e cosa no. Ovviamente questo metodo non è pratico e richiede un impegno (in termini di tempo e costi) non irrilevante. Per questo motivo, nella pratica, per misurare l'intelligibilità si fa ricorso al metodo OGGETTIVO. Anche in questo caso non ci addentreremo nella selva dei diversi descrittori acustici che sono stati introdotti al fine di misurare il grado di intelligibilità ma ci limiteremo, nel prospetto seguente, a fornire un quadro generale abbastanza completo della situazione.

Prospetto B

Descrittore	Significato	Metodo di valutazione
WT	Word Test – Test delle parole. Test basato sulla comprensione da parte degli ascoltatori di specifiche parole contenute all'interno di una frase.	OGGETTIVO
MRT	Modified rhyme test – Prova della rima modificata. Test basato sulla comprensione da parte degli ascoltatori di singoli gruppi di parole in rima	OGGETTIVO
PB	Phonetically Balanced Test – Prova delle parole foneticamente bilanciate. Il test può essere condotto a partire da tabelle standardizzate di 256 oppure 1000 parole	OGGETTIVO
STI	Speech Transmission Index – Indice di Trasmissione del Parlato. Si basa sulla determinazione della funzione di trasferimento di modulazione $m(f)$ per 98 punti ottenuti a partire da 14 frequenze di modulazione e per le 7 bande di ottava comprese tra 125 Hz e 8 kHz	SOGGETTIVO
STIPA	Speech Transmission Index for Public Address System – Indice di Trasmissione del Parlato per sistemi Public Address. Si usa al posto di STI quando il messaggio vocale è riprodotto da un impianto elettroacustico di diffusione sonora (PA System)	SOGGETTIVO
STITEL	Speech Transmission Index for Telecommunication System – Indice di Trasmissione del Parlato per Sistemi di Telecomunicazione. Si usa al posto di STI quando il messaggio vocale è trasmesso attraverso un sistema di telecomunicazione (es.: telefono)	SOGGETTIVO
RASTI	Rapid Speech Transmission Index - Indice di Trasmissione del Parlato Rapido Era una versione semplificata di STI, ma oggi non si usa più	SOGGETTIVO
%ALcons	Articulation Loss of Consonants – Perdita di Articolazione delle Consonanti. Questo descrittore non è attendibile nel caso il messaggio vocale sia diffuso da un impianto elettroacustico. ALcons dipende dal tempo di riverbero, dalla direttività della sorgente e dall'attenzione dell'ascoltatore.	SOGGETTIVO

Riassumendo:

Prospetto C

	Metodi Soggettivi	Metodi Oggettivi
	<ul style="list-style-type: none">• Test di Parole (WT)• Test a rima modificata (MRT)• Test a parole foneticamente bilanciate (PB)	<ul style="list-style-type: none">• STI – STIPA• %ALcons• SIL (Speech Interference Level)• SII (Speech Intelligibility Index)• C50 (Indice di chiarezza a 50 msec)
PRO	<ul style="list-style-type: none">• Molto affidabili• Ben collaudati	<ul style="list-style-type: none">• Metodi in situ veloci e pratici• Alcuni parametri (STI) sono standardizzati• Buona correlazione con l'intelligibilità (soprattutto per valori di intelligibilità medi ed elevati)
CONTRO	<ul style="list-style-type: none">• Molto complessi da gestire e costosi• Parzialmente dipendenti dall'oratore• Dipendenti dal ceppo linguistico• Post-processing lungo	<ul style="list-style-type: none">• Misure indirette dell'intelligibilità• Alcune procedure non semplici da implementare ed automatizzare

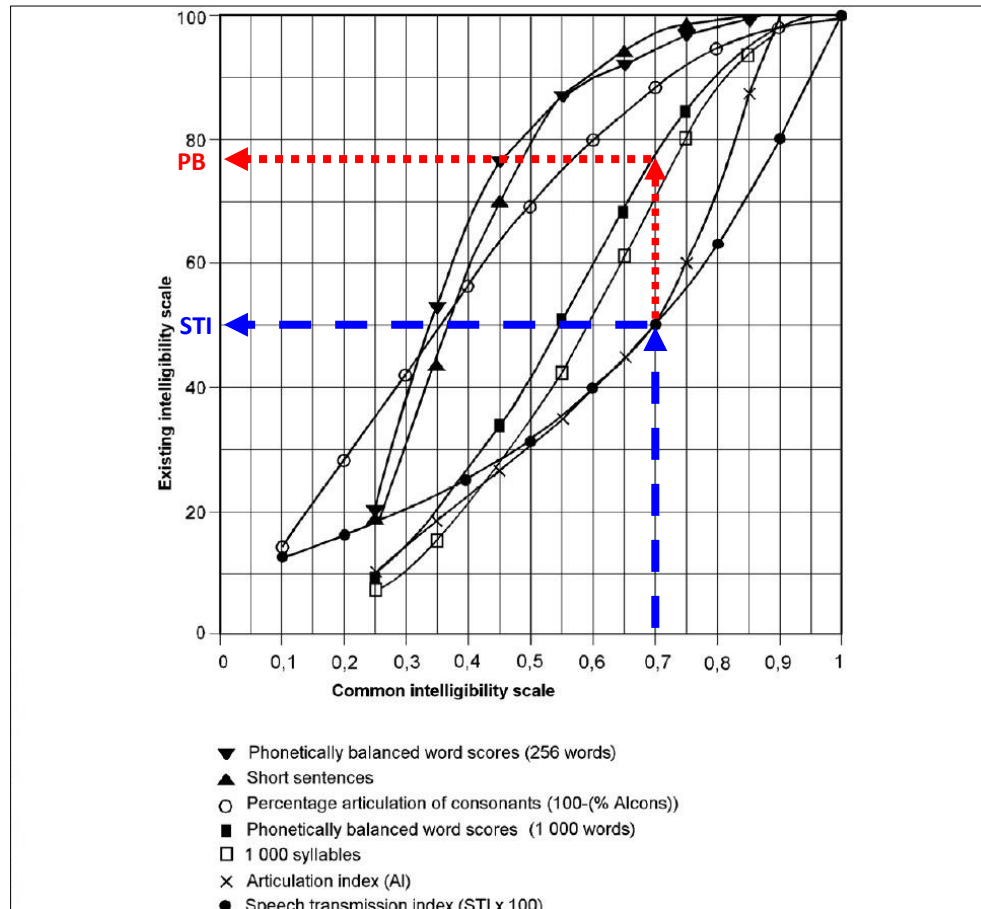
Volendo semplificare questo quadro abbastanza complesso, possiamo comunque affermare che in una grande maggioranza dei casi, il descrittore **STI** (o **STIPA** nel caso sia presente un impianto audio di diffusione sonora) rappresenta la scelta ottimale per la valutazione dell'intelligibilità del parlato.

I valori che **STI** (e/o **STIPA**) può assumere sono compresi nell'intervallo (0 , 1), dove "0" indica la completa mancanza di intelligibilità mentre di converso "1" identifica una situazione di intelligibilità perfetta; ovviamente nella realtà **STI** (e/o **STIPA**) non raggiungerà mai questi valori ma si posizionerà comunque all'interno dell'intervallo sopra indicato: ad un determinato valore corrisponde un certo grado di intelligibilità secondo il seguente schema

Prospetto D

Valore Assunto da STI (STIPA)	Livello di Intelligibilità
$STI > 0.75$	Eccellente
$0.60 < STI \leq 0.75$	Buona
$0.45 < STI \leq 0.60$	Sufficiente/Accettabile
$0.30 < STI \leq 0.45$	Insufficiente/scarsa
$STI < 0.30$	Pessima

Indipendentemente dal metodo scelto per misurare l'intelligibilità, è comunque possibile correlare il dato misurato con il valore degli altri descrittori; tale passaggio può essere effettuato o sfruttando il normogramma che definisce la cosiddetta **CIS** (Common Intelligibility Scale, ossia Scala di Intelligibilità Comune; cfr. CEI EN 60849), oppure sfruttando specifiche formule standardizzate. Di seguito riportiamo il citato normogramma ed un esempio di tali formule.



Nel normogramma a sinistra, abbiamo evidenziato come si possano mettere in correlazione i valori di due diversi metodi di misura dell'intelligibilità.

Partendo da un valore, nella scala comune di intelligibilità di **CIS = 0.7**, risalendo parallelamente all'asse Y si incontra la curva dei valori di **STI** al valore **STI = 0.5**; spostandosi ulteriormente in verticale, si incontra poi la curva relativa ai valori ottenuti col metodo **PB** (parole foneticamente bilanciate) al punto **PB = 78**.

Si ha quindi

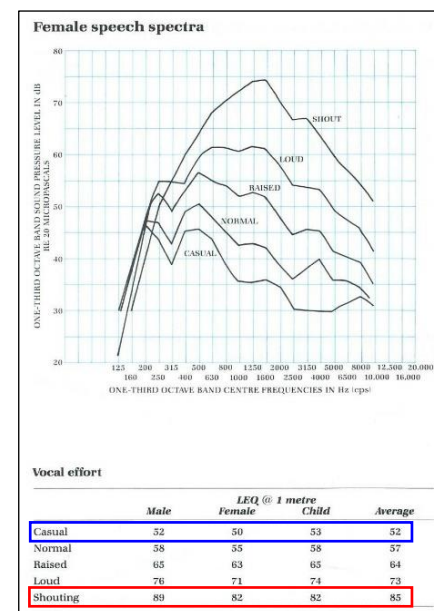
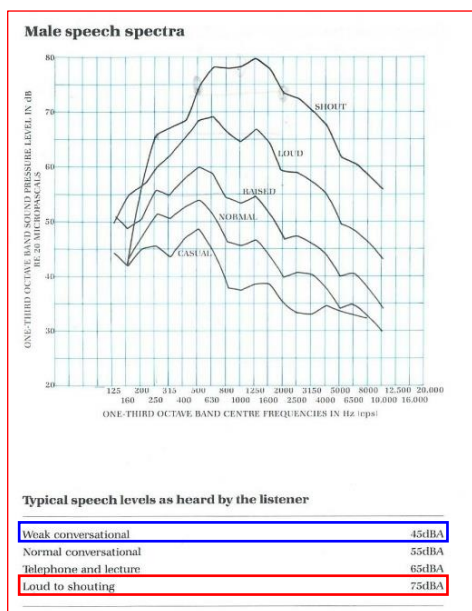
$$\text{CIS} = 0.7 \Rightarrow \text{STI} = 0.5 \Rightarrow \text{PB} = 78$$

Alternativamente se vogliamo porre in relazione il valore di intelligibilità misurato col metodo **STI** con quello ottenuto misurando la perdita di articolazione delle consonanti, sussiste la seguente relazione:

$$\%ALcons = 170,4505 \cdot e^{-5.419 \cdot STI}$$

Prima di passare al capitolo successivo, è bene spendere ancora qualche parole in merito al parlato, ossia l'evento sonoro che rappresenta il criterio qualitativo fondamentale per la tipologia di sale oggetto di questo modulo.

La potenza sonora istantanea della voce umana può variare in modo considerevole nel tempo; di seguito riportiamo i grafici degli spettri sonori di un oratore maschio e femmina in funzione del livello di emissione



Si osservi come tra una conversazione “normale” e una conversazione “urlata” ci sia una differenza di circa 30 dB, sia in termini di percezione da parte dell’ascoltatore, sia in termini di sforzo vocale dell’oratore.

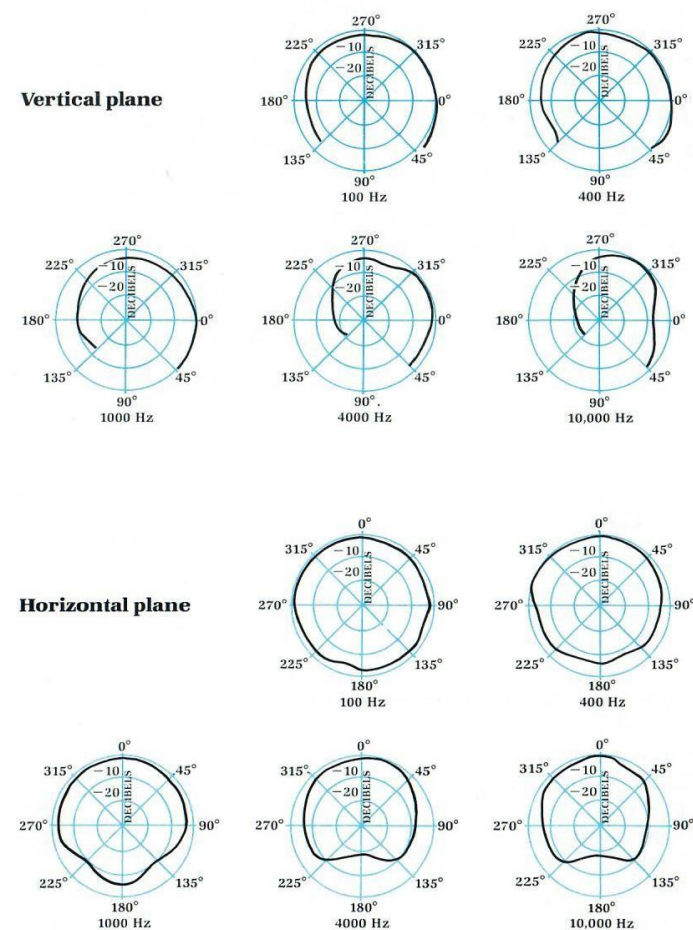
Un’altra fondamentale caratteristica di cui occorre tener conto, soprattutto nelle sale dove NON è previsto un impianto elettroacustico di diffusione sonora, è la **direttività** della voce umana.

Qui a fianco riportiamo i diagrammi polari che mostrano come la direttività della voce umana vari in funzione della frequenza e dell’angolo di emissione sia sul piano verticale che orizzontale.

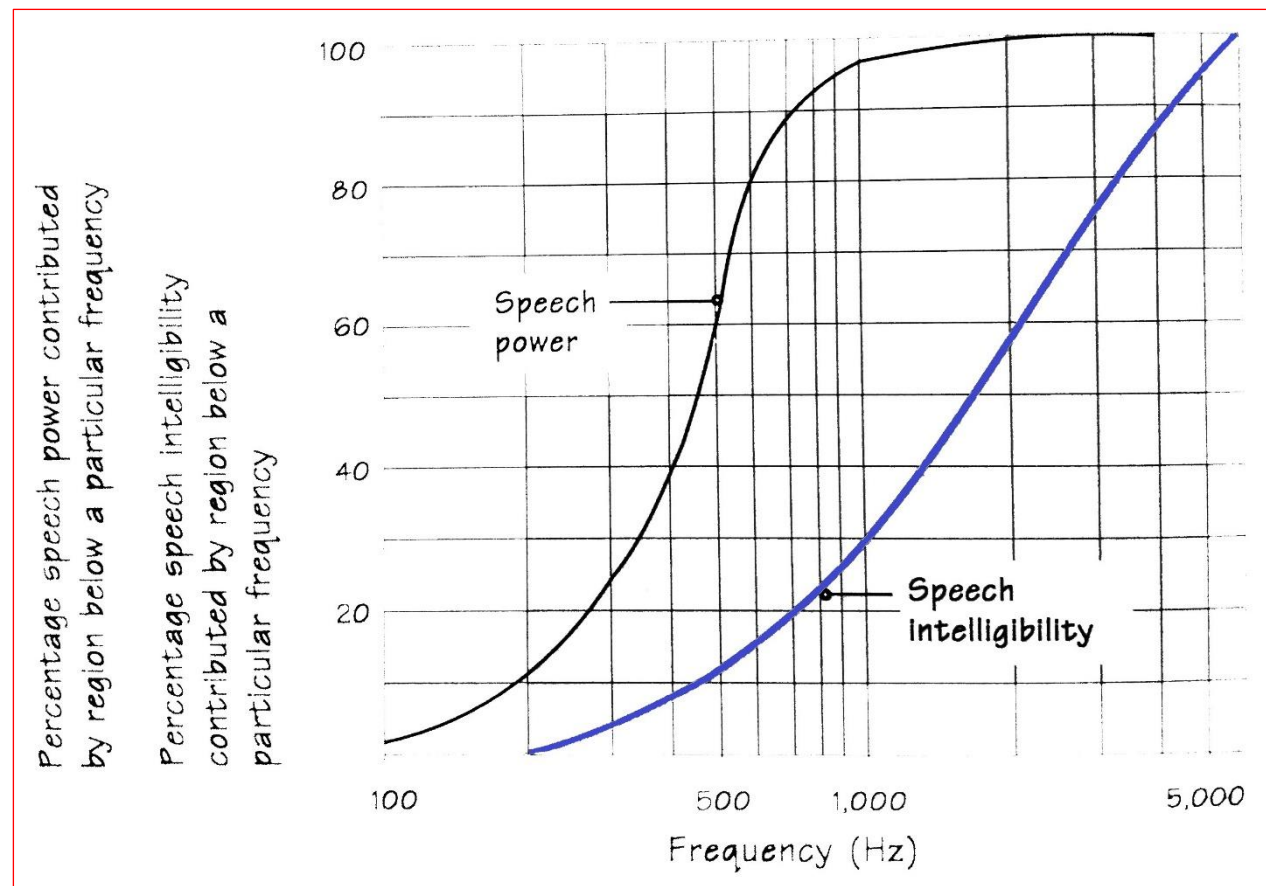
L’ultimo aspetto che riguarda la voce umana e che occorre sottolineare concerne il rapporto che intercorre tra la potenza sonora di un messaggio vocale e la sua intelligibilità.

Della potenza sonora totale di un messaggio vocale, circa il 90-95% giace nella porzione di spettro al di sotto dei 1.000 Hz; di converso questa regione dello spettro contribuisce solo per il 30% all’intelligibilità. Questa relazione peggiora ancora se si scende in frequenza; al di sotto dei 500 Hz è contenuto

Directional characteristics of human voice
After Dunn and Farnsworth



il 60% del contributo energetico del parlato ma solo il 10% dell'intelligibilità. Il grafico seguente consente di porre in relazione i due aspetti.



La ragione di ciò va ricercata nel fatto che la maggior parte della potenza sonora del parlato è contenuta nelle vocali, mentre la maggior parte del significato (e quindi dell'intelligibilità) è contenuta nelle consonanti.

Nella tabella seguente mostriamo con un semplice esempio, come, lasciando di un testo da un lato solo le vocali, dall'altro solo le consonanti, la probabilità di ricostruire il testo originale cambi radicalmente.

Solo Vocali

ee ao i u ue'eo oe, e uea iee, e a aa ae e'ui oioe
i uao eue

Solo Consonanti

Smpr cr m f qst'rm cl, qst sp, ch d tnt prt
dll'ltm rzznt l grd scld

Testo Completo

Sempre caro mi fu quest'ermo colle, e questa siepe, che da tanta parte dell'ultimo orizzonte il guardo esclude

REGOLA AUREA

Nel progettare un auditorium o un teatro (o qualsiasi altro ambiente destinato alla diffusione e comprensione del parlato) è importante assicurarsi che le alte frequenze siano poco attenuate lungo il percorso che va dall'oratore all'ascoltatore.

Ciò significa che nello spazio che sta tra oratore e ascoltatore è bene NON posizionare materiale fonoassorbente

di tipo poroso che, com'è noto, presenta il massimo del proprio fonoassorbimento da 500 Hz in su.

Il fonoassorbimento andrà concentrato nelle parti terminali dell'ambiente (soprattutto sulle pareti di fondo opposte all'oratore) ed eventualmente sulle superfici generatrici di echi.

3 Sale per il Parlato

Rientrano in questa vasta categoria ambienti anche molto diversi tra loro, sia per destinazione d'uso che per volumetria: sale di lettura, sale conferenza, aule scolastiche, aule magne, teatri di prosa, ecc.

Il requisito primario degli ambienti in cui la trasmissione del messaggio vocale rappresenta un requisito essenziale è che il parlato risulti intelligibile agevolmente (ossia senza un eccesso di sforzo da parte dell'ascoltatore) in tutti gli ordini di posti.

Il secondo requisito consiste nel garantire che il timbro naturale dell'oratore rimanga ovunque intatto e non distorto. Nel caso nella sala sia presente un sistema elettroacustico di rinforzo (normalmente detto "impianto audio"), questo deve caratterizzarsi per l'elevata fedeltà di riproduzione e per il contenuto livello di amplificazione, onde evitare qualsiasi effetto di artificialità nel segnale riprodotto.

È possibile, semplificando la trattazione, identificare 5 regole chiave che dovrebbero essere sempre seguite quando si affronta la progettazione di una sala per il parlato, regole che riassumiamo nel prospetto successivo.

Prospetto E. Regole Base per la progettazione di una Sala per il Parlato

Parola Chiave	Concetto
Riverbero	La progettazione deve mirare al raggiungimento di un tempo di riverbero corretto/ottimale e al conseguente raggiungimento di un valore adeguato di intelligibilità in tutta la sala, senza eccessive fluttuazioni da un posto all'altro.
Eco	Fenomeni di Eco e Flutter-eco rappresentano un deficit acustico molto grave, anche in presenza di bassi tempi di riverbero e vanno assolutamente indagati a livello progettuale e opportunamente trattati e/o rimossi.
Loudness	La progettazione deve, tra le sue finalità, puntare a massimizzare su tutta la sala la “percezione soggettiva di intensità sonora”, ossia quella sensazione che viene efficacemente resa dal termine inglese <i>loudness</i> .
Rumore	Il rumore è il fenomeno che più contribuisce a deprimere l'intelligibilità del parlato. La progettazione deve pertanto mirare a minimizzare il livello del rumore presente nell'ambiente sia quello dovuto a fonti esterne (isolamento acustico dell'ambiente) che quello proveniente dall'interno (rumorosità degli impianti).
Impianto Audio	In ambienti in cui le dimensioni geometriche sono rilevanti diventa necessario ricorrere ad un impianto elettroacustico di diffusione sonora; tale impianto dovrà essere progettato, installato e messo a punto da ditte/professionisti qualificati.

Tutte queste semplice regole generali sono tese al raggiungimento di un parlato intelligibile e naturale in tutti gli ordini di posti; di alcune però non ci occuperemo in quanto o sono già argomento di altri moduli di questo corso (isolamento dai rumori esterni all'edificio; controllo del rumore dovuto agli impianti interni all'edificio), o non rientrano nello scopo del corso stesso (progettazione impianti audio).

Nel seguito ci concentreremo quindi sugli aspetti che concernono il riverbero, la dimensione e le caratteristiche geometriche dell'ambiente.

3.1 Dimensionamento di una sala per il parlato

Una sala per il parlato dovrebbe minimizzare il volume: minore infatti è il rapporto volume/numero posti, maggiore è la quantità di energia sonora a disposizione di ogni ascoltatore. Inoltre, se il volume è ridotto anche il tempo di riverbero risulterà inferiore (*ricordiamo che RT è direttamente proporzionale a V*) e quindi non saranno necessarie ampie superfici fonoassorbenti; di converso sarà possibile destinare ampie superfici a pannellature riflettenti che hanno il vantaggio di aumentare la *loudness* (sensazione di intensità sonora) in quanto vanno a rinforzare l'onda diretta. Nel prospetto seguente forniamo gli intervalli ottimali dell'area in pianta e del volume che andrebbero destinate ad ogni singolo ascoltatore:

Prospetto F

Parametro dimensionale	Valore minimo (aule scolastiche – salette convegni)	Valore massimo (Sale conferenza – Teatri di prosa)
Area per posto a sedere	0.6 m ² per persona/posto	0.8 m ² per persona/posto
Volume per posto a sedere	2.2 m ³ per persona/posto	5.5 m ³ per persona/posto

NOTA: Questa regola vale solo per le sale per il parlato. In ambienti destinati a rappresentazione musicali (sala da concerti), il rapporto volume/numero di posti deve essere significativamente superiore, pena l'ottenimento di un'acustica "sorda" e priva di "calore", condizione assolutamente da evitare.

Sappiamo che il livello sonoro decresce mano a mano che ci si allontana dalla sorgente; il tasso a cui il livello sonoro diminuisce è maggiore in condizione di campo libero e minore in campo semiriverberante.

In una sala per il parlato sappiamo però che il tempo di riverbero deve essere oggettivamente esiguo, pertanto la diminuzione del livello del parlato sarà comunque significativa. Ai fini della comprensione della parola occorre però tenere conto che la possibilità di distinguere i movimenti e/o la mimica facciale dell'oratore incrementano l'intelligibilità compensando parzialmente la perdita di energia sonora, questo almeno fino ad una certa distanza: si veda a tale proposito il prospetto seguente

Prospetto G

Fenomeno che incrementa l'intelligibilità	Massima distanza a cui risulta mediamente ben percepibile il fenomeno
Ampi movimenti del corpo	30 metri
Gestualità	20 metri
Mimica facciale	10 metri

Tenendo conto di tutti questi fattori (diminuzione del livello sonoro con la distanza e visibilità dei fenomeni che si svolgono sul palco) la letteratura di settore fissa due limiti massimi in funzione della tipologia di sala, limiti che riportiamo nel prospetto successivo.

Prospetto H

Tipologia di sala	Massima distanza dell'ultimo spettatore
Sala da lettura	20-22 metri
Teatro di prosa	25-28 metri

Oltre queste distanze diventa necessario ricorrere a supporti audio/video se si vogliono garantire al contempo una visione corretta e un ascolto intelligibile.

Abbiamo quindi già tutti gli elementi per eseguire un primo calcolo di dimensionamento di massima della sala e lo faremo con un esempio concreto, andando ad eseguire il calcolo preliminare di dimensionamento di un teatro di prosa di medie dimensioni utilizzando, come base di confronto, le dimensioni e la capienza di un teatro reale ed in particolare il teatro di prosa **TeatroDue** di Parma, di cui nel prospetto successivo riportiamo i dati salienti.



F O N D A Z I O N E
TeatroDue
P A R M A

Spazio teatrale frontale. La configurazione della sala è articolata in platea e galleria. Capienza massima 500 posti.

Specifiche tecniche:

Dimensioni boccascena: larghezza 11,65 m.; altezza 6,6 m.

Dimensioni palcoscenico: larghezza 12,40 m.; profondità 12,60 m.

Graticcia: altezza 11,50 m.

Declivio palcoscenico: 1%

Potenza elettrica disponibile: 150 Kw totali.

Partiremo quindi andando a determinare i dati geometrici generali di un teatro di cui abbiamo fissato essendo nota la capienza (500 posti) e la destinazione d'uso (teatro di prosa). Di seguito riportiamo l'esito di tale calcolo nel quale abbiamo fatto uso di tutti i concetti e le formule/normogrammi precedentemente introdotti e descritti.

Dati di Input			Calcoli Dimensionali Preliminari		
Tipo di Sala	Teatro di Prosa	Unità di misura	Area in pianta	325	m ²
Numero Posti	500	sedute	Profondità massima	25	m
Area per posto	0.65	m ²	Larghezza Sala (*)	13	m
Volume per posto	5	m ³	Volume	2500	m ³
			Altezza della sala (**)	7.7	m
			(*) valore indicativo per una sala a pianta rettangolare		
			(**) volume della sala esclusa l'eventuale torre scenica sopra il palco		

Com'è possibile notare, già da un primo calcolo emergono dati geometrici coerenti con quelli del caso reale che abbiamo preso come guida: il palcoscenico di TeatroDue ha una larghezza massima di 12,4 metri e infatti il calcolo restituisce una larghezza massima della sala di 13 m; inoltre pur in assenza di un dato certo è possibile notare come anche l'altezza risulta coerente con quanto si osserva nelle foto precedenti.

Accertato che questo primo calcolo ci ha restituito parametri dimensionali corretti e coerenti possiamo ora introdurre un altro criterio fondamentale, che abbiamo già brevemente accennato in precedenza e che è sintetizzabile nel fatto che in una sala per il parlato non si dovrebbe mai fare ricorso ad un uso eccessivo di fonoassorbente in quanto:

REGOLA AUREA

In una sala per il parlato la maggior parte (> 60%) dell'assorbimento acustico dovrebbe essere fornito dal pubblico.

COROLLARIO

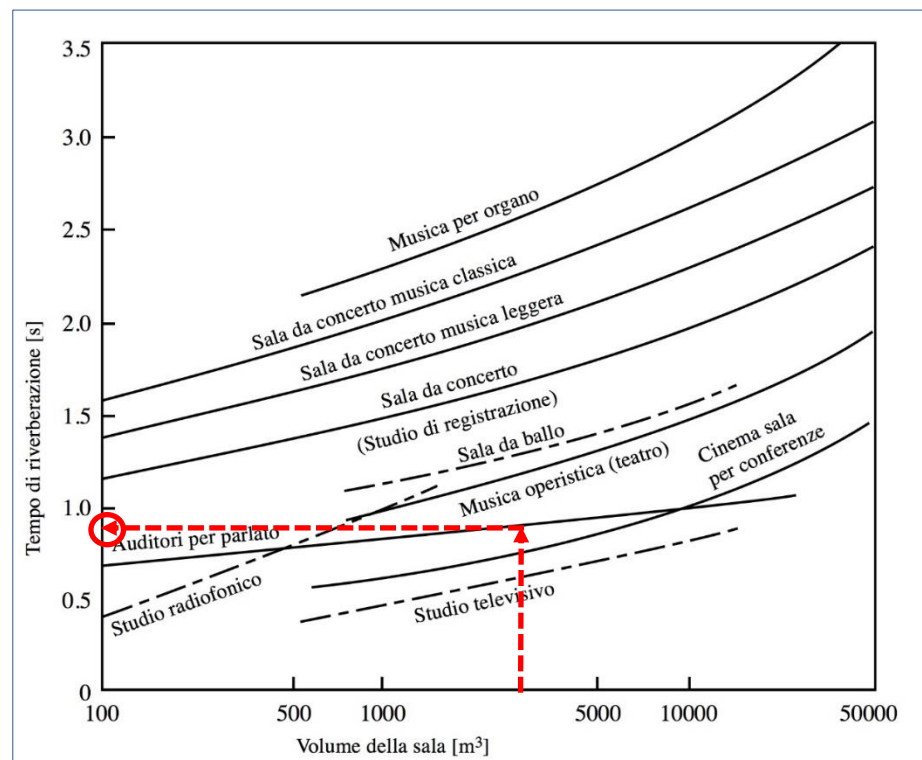
Poiché può accadere che i posti non risultino tutti occupati, in una sala per il parlato è fondamentale che le sedute siano caratterizzate da un assorbimento acustico pressoché equivalente a quello di una persona.

Procediamo allora nel nostro calcolo preliminare e andiamo a vedere cosa succede se seguiamo questa regola; per semplicità eseguiremo il calcolo per la sola frequenza centrale di 1000 Hz (oltre la quale, lo ricordiamo, sta il 70% del contributo all'intelligibilità)

Dimensioni	Valore	Fonoassorbimento	Valore	Calcolo RT a 1 kHz	RT _(1 kHz)
X	13	α medio superfici interne a 1 kHz	0.08	<i>Sabine ($\alpha \geq 0.2$ - non attendibile)</i>	<i>1.05</i>
Y	25	α pubblico a 1 kHz	0.55	Eyring	0.93
Z	7.7	m assorbimento aria a 1 kHz	0.001	RT ottimale per una sala da 3300 m ³	0.90
Superficie Totale, S _T	1235	Assorbimento Sala	99	CONCLUSIONE Non è necessario introdurre alcun trattamento fonoassorbente per ridurre il tempo di riverbero. Unica eccezione eventuali interventi sulle superfici acusticamente critiche.	
Volume, V	2503	Assorbimento Pubblico	275		
Pubblico	500	Assorbimento Totale	374		
		α medio complessivo	0.30		

Osserviamo che:

- Abbiamo assunto che la sala non presenti di per sé significative proprietà fonoassorbenti, avendo assegnato un coefficiente di assorbimento medio di tutti gli elementi (pareti, pavimento, rivestimenti, ecc.) pari a “solo” $\alpha = 0.08$ a 1 kHz.
- Il calcolo mostra come il pubblico contribuisca per quasi il 74% all’assorbimento acustico totale della Sala, in perfetta linea con la regola precedentemente enunciata.
- Con un valor medio di α maggiore di a 0.2, per stimare il valore di RT a 1 kHz abbiamo usato la formula di Eyring, da cui emerge che RT risulta sostanzialmente in linea con il valore ottimale per una sala avente un volume di circa 3300 m³, come è mostrato nell’immagine successiva.



Vediamo quindi come in genere in una sala per il parlato non sia necessario introdurre quantità significative di materiale fonoassorbente, ma sia di converso necessario adottare sedute altamente fonoassorbenti in modo da ovviare ad eventuale lacune in platea. Può però accadere (come vedremo nel seguito) che sia comunque necessario introdurre trattamenti acustici correttivi ed in particolare:

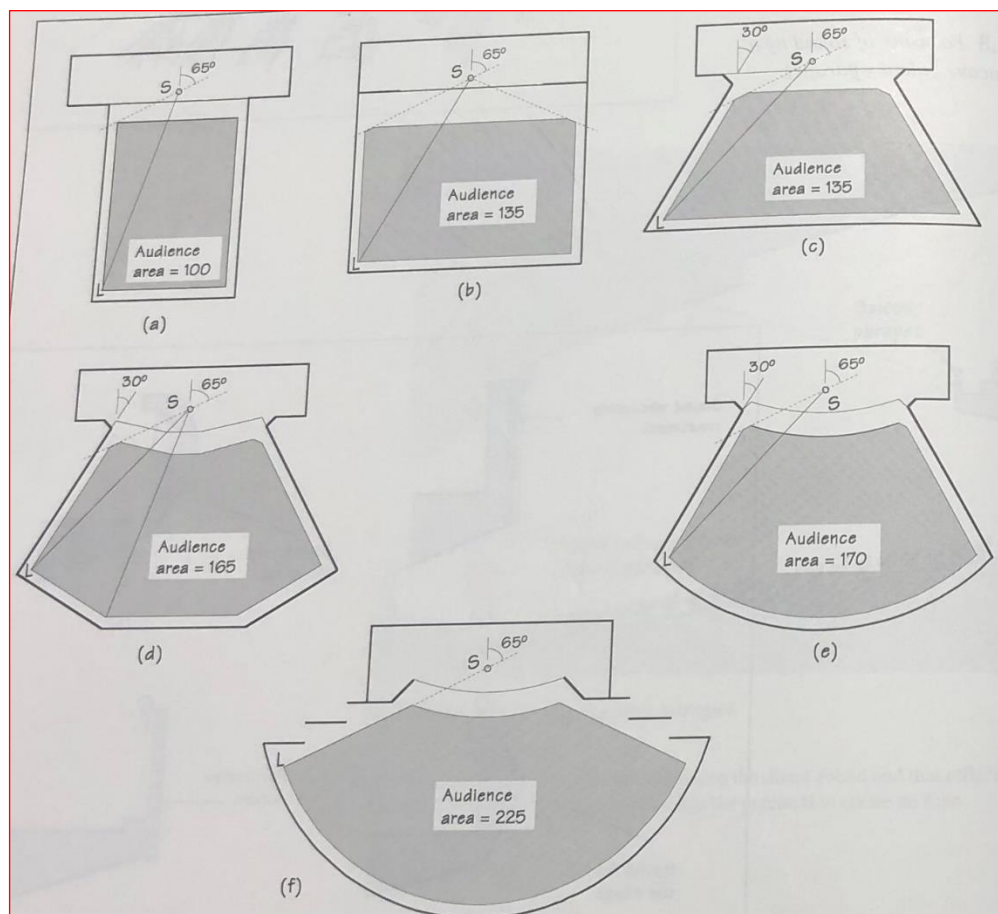
- ||| Trattamenti per ridurre/eliminare la generazione di echi da parte di specifiche superfici (in genere la parete di fondo o il/i parapetto/i della/e balconata/e)
- ||| Diminuire il tempo di riverbero qualora la sala sia significativamente più grande rispetto ai valori ottimali fissati in precedenza.

In questo caso è bene avere presente che la sala, oltre ad un trattamento fonoassorbente, dovrà prevedere anche la presenza di un impianto elettroacustico di diffusione sonora onde rinforzare il suono nelle porzioni più distanti e/o più elevate della sala.

Avendo concluso l'analisi dimensionale preliminare della sala, passiamo nel capitolo successivo ad affrontare il problema della progettazione geometrica.

3.2 Geometria di una sala per il parlato

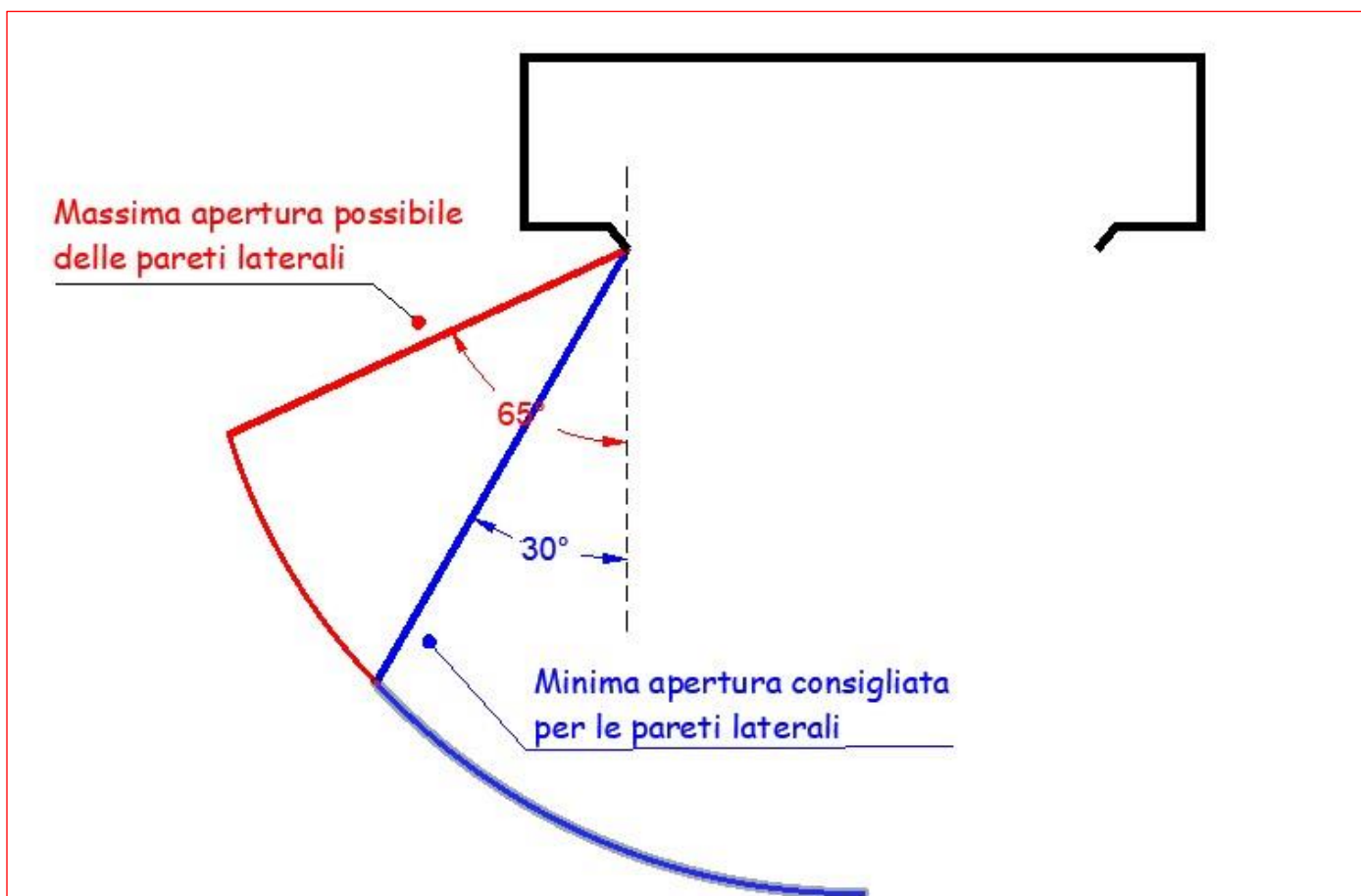
Al fine di minimizzare la distanza oratore-ascoltatore è possibile “giocare” sulla geometria della sala; in particolare risulta particolarmente utile “aprire” le pareti laterali dando alla sala una forma a ventaglio (fan-shape).



Mantenendo fissa la massima distanza L tra oratore e ascoltatore, nella figura a fianco mostriamo come, variando la forma della sala, sia possibile incrementare il numero di posti a sedere; in questa serie di immagini (fonte: M. Mehta, J. Johnson, J. Rocafor, “Architectural Acoustics. Principles and Design”; Prentice-Hall, 1999) è infatti possibile notare come l’area usufruibile per il pubblico aumenti progressivamente in funzione della “apertura” delle pareti laterali della sala.

Un ulteriore vantaggio che deriva dalla forma a ventaglio della sala è dato dal fatto che le riflessioni che le pareti laterali generano sono tutte dirette verso il fondo della sala e quindi vanno a beneficio degli ascoltatori delle ultime file.

Nel decidere quanto sia possibile “aprire” le pareti laterali onde fornire alla sala la pianta a ventaglio, è necessario tenere conto della direzionalità della voce umana (vedi diagrammi polari precedenti); senza entrare in un eccessivo dettaglio tecnico-geometrico, nella figura seguente mostriamo quali sono gli angoli limite di apertura delle pareti laterali:

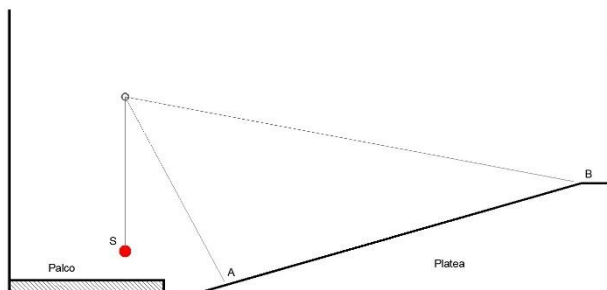


Analizzata la geometria in pianta della sala, possiamo ora passare a valutare la forma geometrica della sua sezione longitudinale.

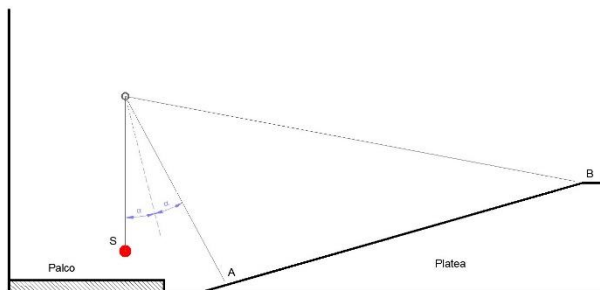
La prima cosa – e più importante – su cui occorre concentrarsi, dal punto di vista della sezione geometrica longitudinale, nella progettazione acustica di una sala per il parlato è l'andamento del soffitto; il soffitto infatti gioca un ruolo fondamentale nel garantire un efficace rinforzo dell'Onda Diretta.

Nelle numerose figure successive mostreremo, step by step, come sia possibile costruire un soffitto acusticamente idoneo per una sala.

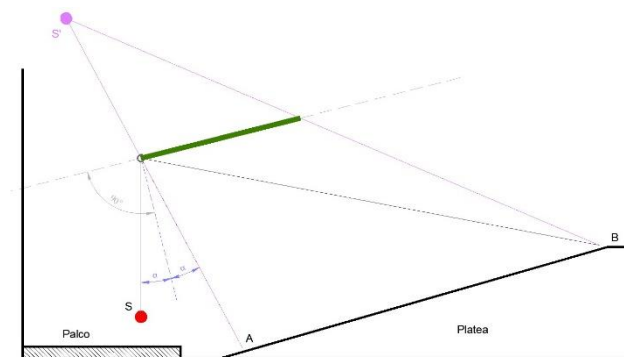
Step 1



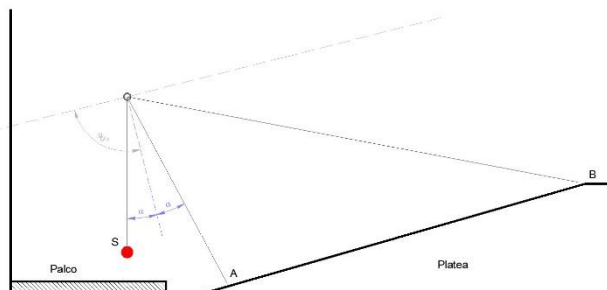
1.A



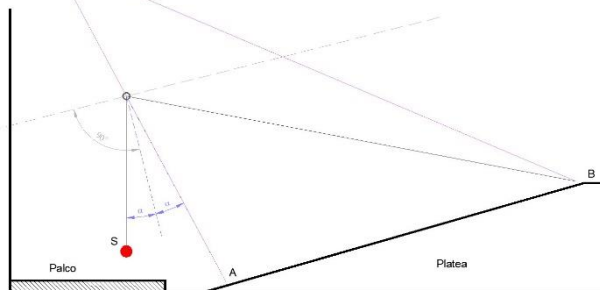
1.B



1.E

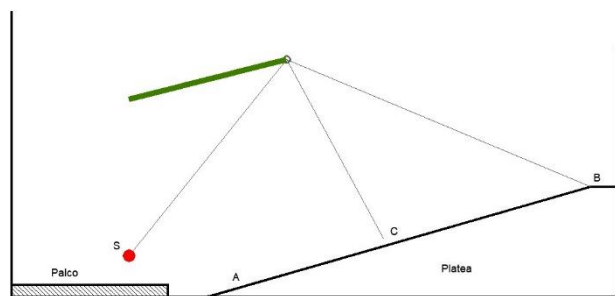


1.C

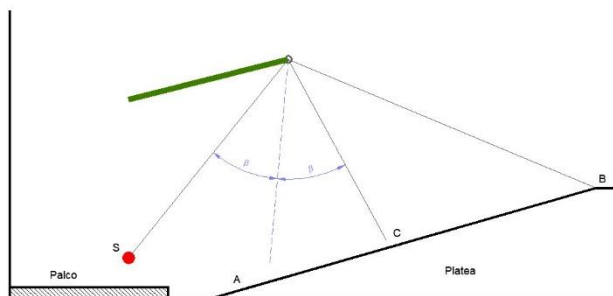


1.D

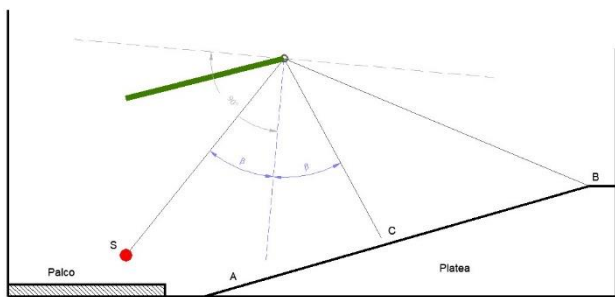
Step 2



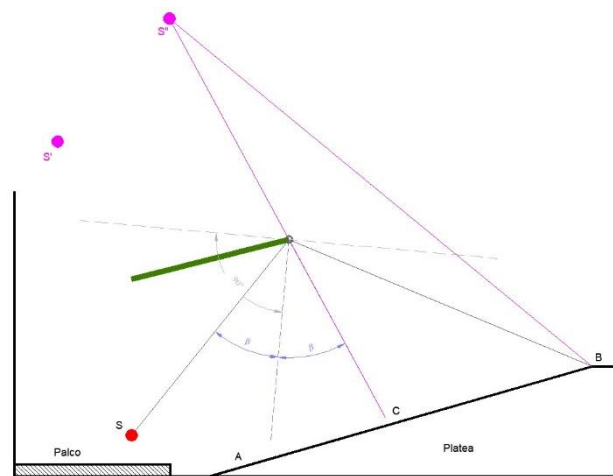
2.A



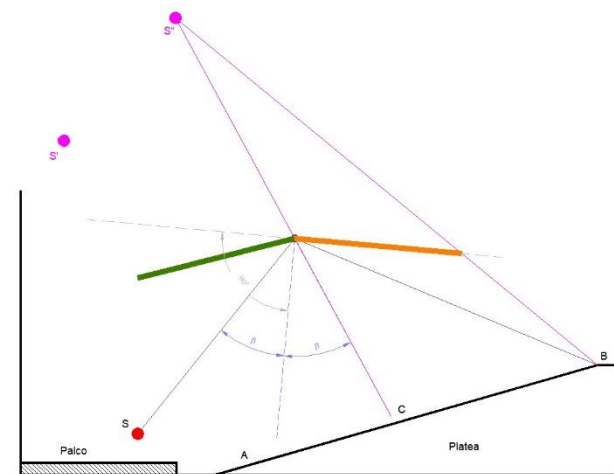
2.B



2.C

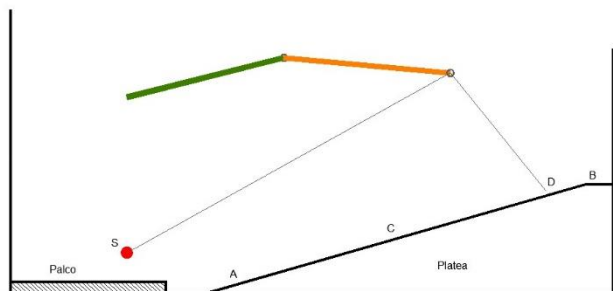


2.D

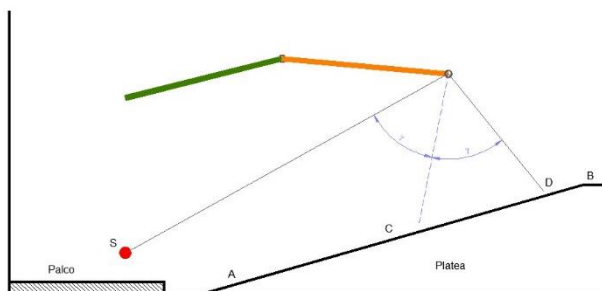


2.E

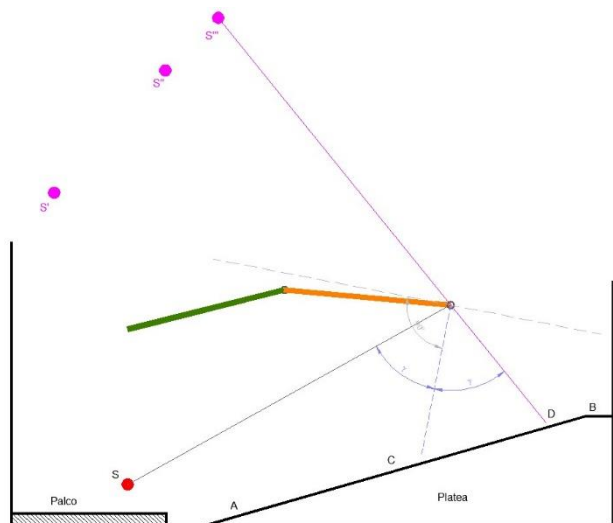
Step 3



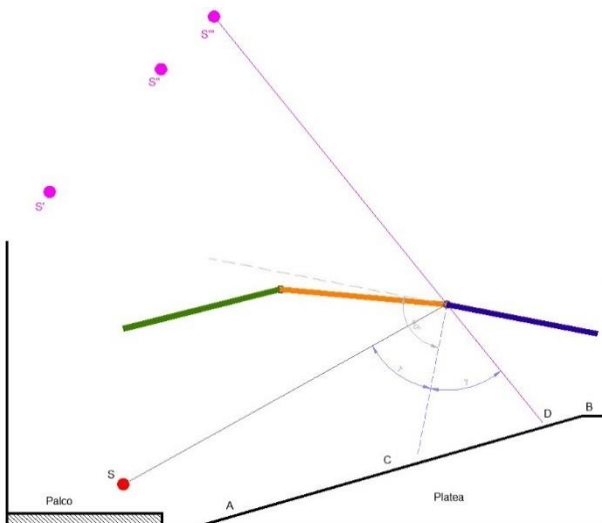
3.A



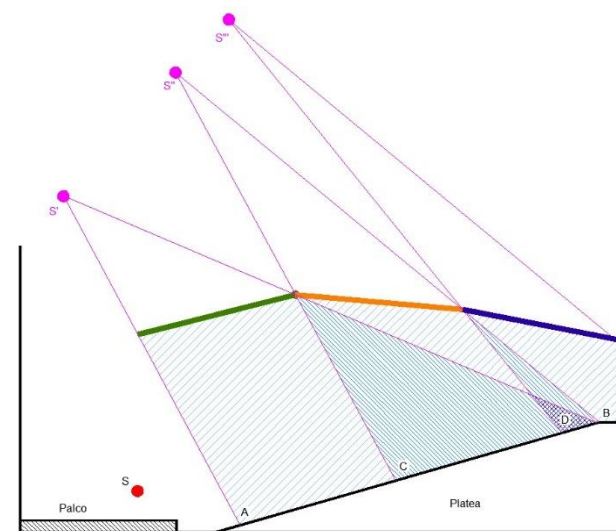
3.B



3.C



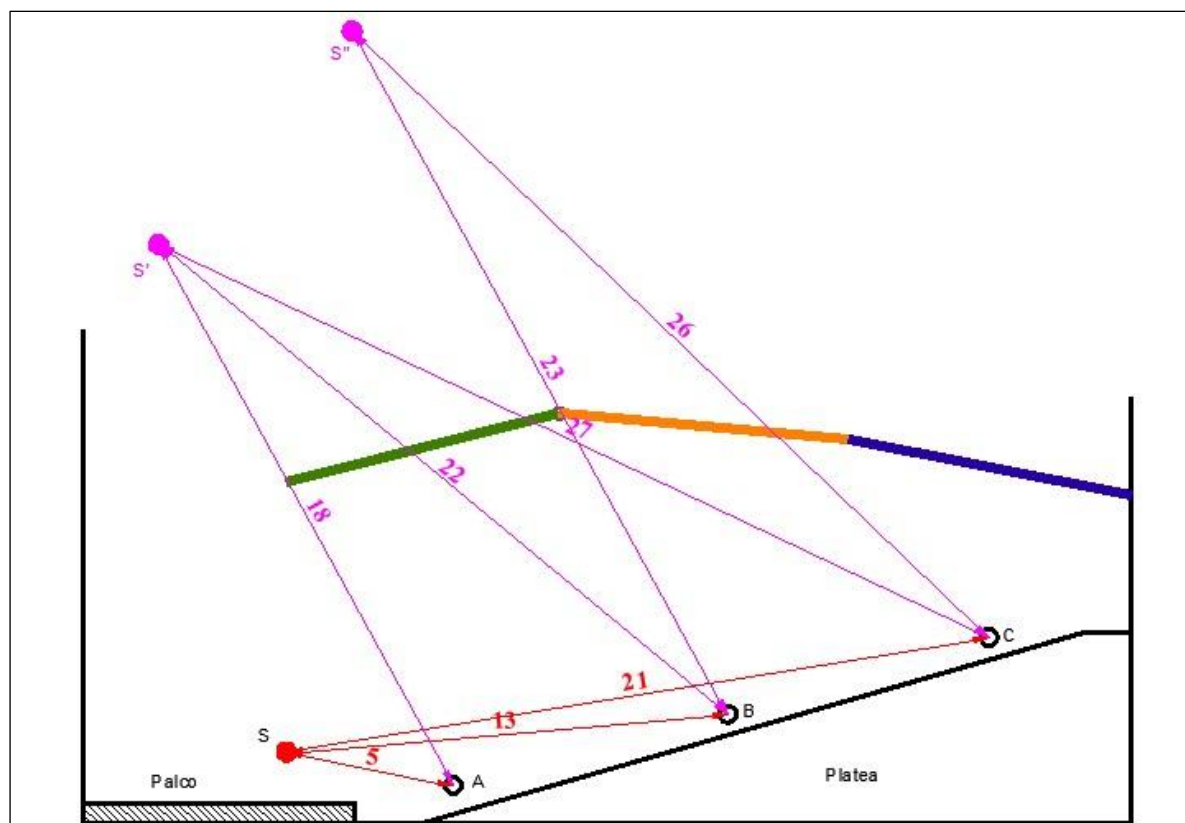
3.D



3.E

L'ultima figura (3.E) evidenzia come il soffitto così costruito copra l'intera area occupata dal pubblico e garantisca la presenza di zone dove si sovrappongano i "rinforzi" sonori dovuti alle riflessioni generate dalle varie sezioni del soffitto stesso.

Una volta così costruito il soffitto dovrà infine essere sottoposto ad un'ulteriore check acustico, dovendosi verificare che nessuna delle porzioni del soffitto sia generatrice di echi; nella figura seguente mostriamo come debba procedere geometricamente la ricerca



In pratica, per ogni postazione di ascolto (posto a sedere) occorre calcolare la differenza tra il cammino dell'Onda Diretta (raggio acustico che congiunge la Sorgente **S** con il singolo punto di ascolto) e delle Onde Riflesse dal soffitto (raggi acustici che congiungono le sorgenti immagine **S'**, **S''**, ecc. con il medesimo punto di ascolto) e verificare se tale differenza risulta superiore a 20 metri.

In teoria la distanza minima per la percezione dell'eco sarebbe di 17 m, ma ciò è vero solo in assenza di rumore di fondo e per suoni di brevissima durata; durante un evento sonoro reale, l'accavallarsi delle parole (o delle note) impedisce di fatto di percepire come nettamente distinti due suoni che non siano separati di almeno 60 msec, equivalenti appunto a 20 m circa.

Nella tabella alla pagina successiva eseguiamo la verifica per i 3 punti A, B e C presi come esempio nella figura precedente:

Prospetto H

Coppia di punti	Percorso (m)	Differenza	Eco ? (Si No)
S-A (onda diretta)	5	13	No
S'-A (riflessione prima sezione soffitto)	18		
S-B (onda diretta)	13	9	No
S'-B (riflessione prima sezione soffitto)	22		
S-B (onda diretta)	13	10	No
S''-B (riflessione seconda sezione soffitto)	23		
S-C (onda diretta)	21	6	No
S'-C (riflessione prima sezione soffitto)	27		
S-C (onda diretta)	21	5	No
S''-C (riflessione seconda sezione soffitto)	26		

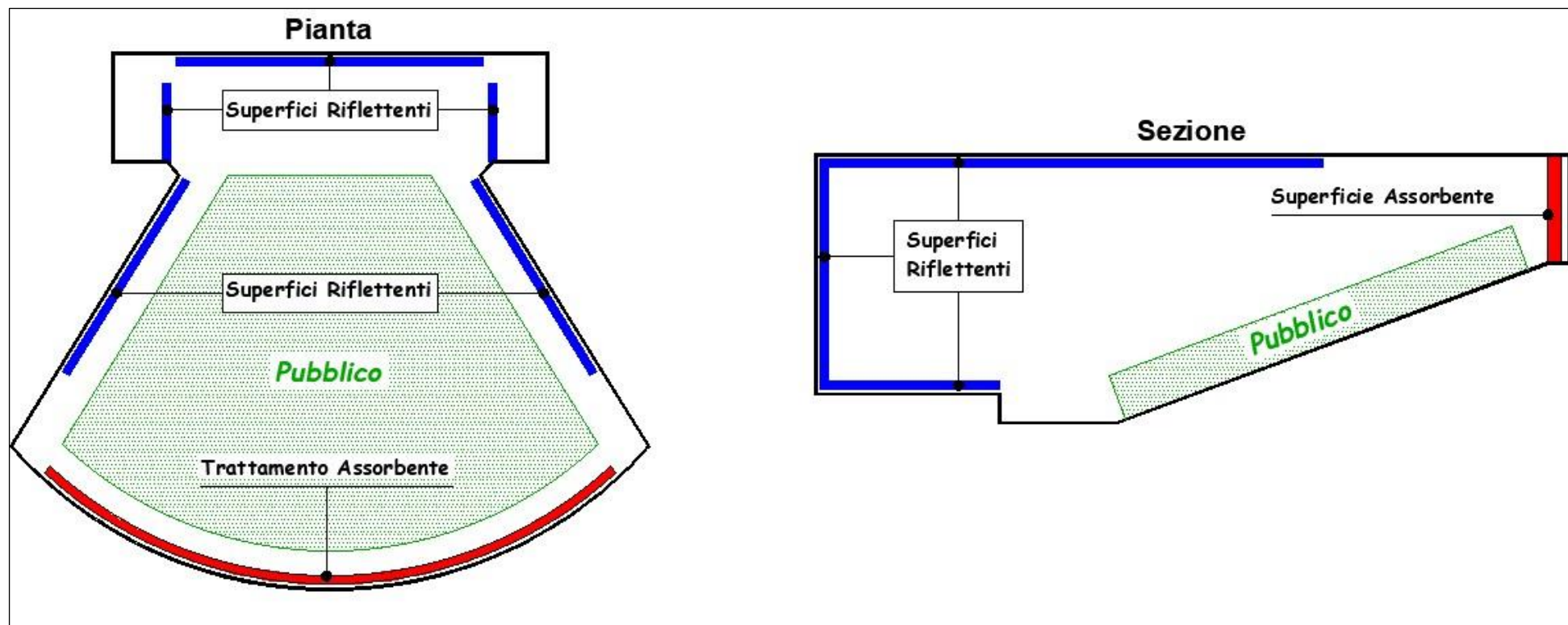
Ovviamente il check va eseguito per tutti i punti avendo l'accortezza di considerare solo le porzioni di soffitto che effettivamente generano una determinata riflessione.

In precedenza, abbiamo visto come in generale non sia necessario ricorrere a trattamenti fonoassorbenti; nel caso ciò si rivelasse necessario (superfici generatrici di echi; sala di dimensioni maggiori rispetto a quelle ottimali e conseguente eccesso di riverberazione), diventa fondamentale capire dove è sbagliato posizionare il materiale fonoassorbente.

Come abbiamo visto in precedenza, i materiali che normalmente vengono impiegati in queste situazioni sono caratterizzati da un meccanismo di “assorbimento per porosità” con la conseguenza che i valori di α si impennano dopo i 400 Hz; l’uso eccessivo di tali tipologie di materiali fonoassorbenti si traduce in una notevole sottrazione di energia acustica alle frequenze medio-alte e alte, ossia quelle dove è concentrata la massima quota di intelligibilità; il risultato sarà che gli spettatori posizionati nelle file più lontane faranno molta fatica a comprendere ciò che viene pronunciato dall’oratore.

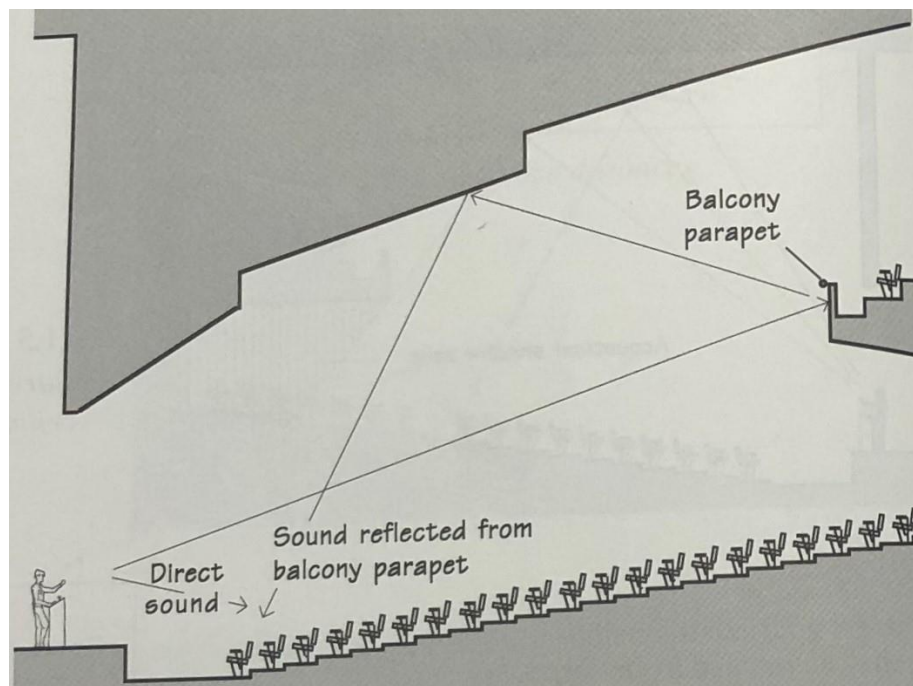
Il fonoassorbente andrebbe pertanto utilizzato in quantità limitate e solamente per trattare le superfici critiche e/o nelle quantità minime necessarie per ridurre un eccesso di riverberazione; occorre inoltre evitare di posizionarlo lungo il percorso Sorgente-Ricevitore.

Nella figura seguente riportiamo uno schizzo che mostra quale dovrebbe essere, in linea di massima, lo schema di posizionamento dei materiali acustici all’interno di una sala per il parlato.

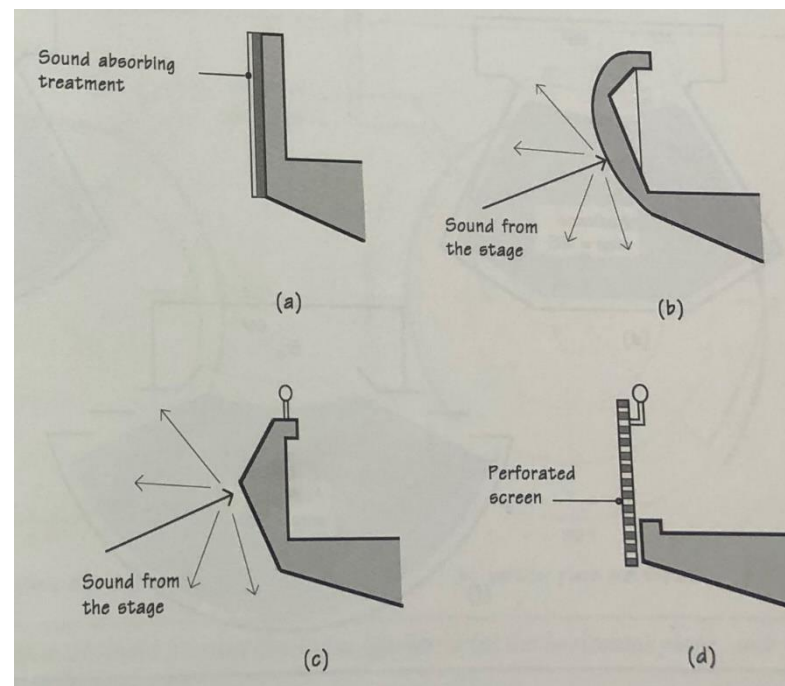


Quando ad una sala è richiesta una capienza superiore ma occorre rimanere entro le dimensioni geometriche ottimali, diventa necessario ricorrere alla presenza di una (o più) balconata (e). In questo caso il fronte della balconata e l'eventuale parapetto (es.: parapetto in vetro antisfondamento e quindi acusticamente riflettente) possono costituire una criticità acustica significativa in quanto superfici potenzialmente generatrici di echi o comunque di forti riflessioni più o meno focalizzate.

Nelle figure seguenti mostriamo quali possano essere tali criticità e come possano essere mitigate (fonte delle immagini: “Architectural Acoustics. Principles and Design” cit.)



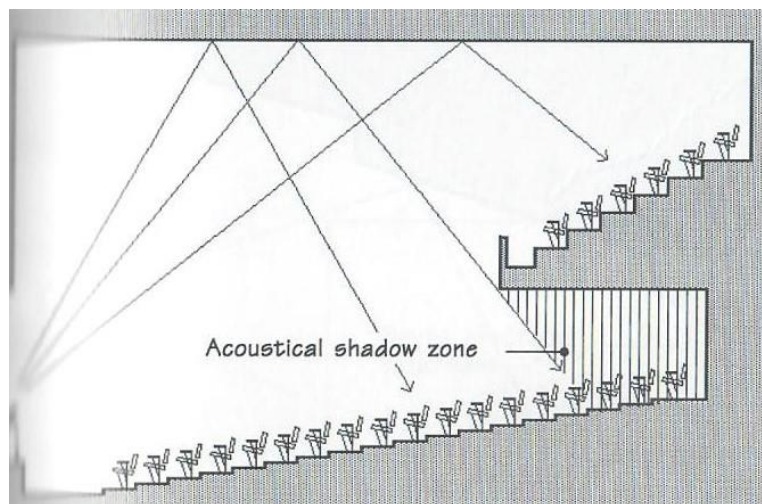
Riflessione generata dal parapetto della balconata



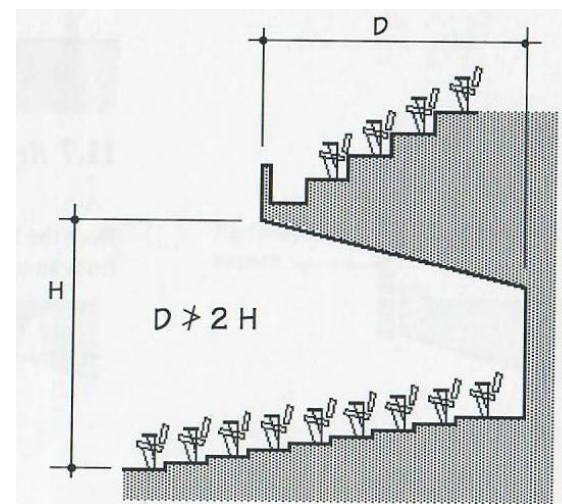
Possibili modalità di trattamento del parapetto

Avendo introdotto poi il concetto di balconata, è importante, come ultimo aspetto trattato in questo modulo, sottolineare che se non correttamente progettata la balconata può mettere in “ombra acustica” gli ascoltatori posizionati nella parte più distale

della platea; a seguire riportiamo due figure (fonte: “Architectural Acoustics. Principles and Design”, cit.) che mostrano perché si generi l’ombra acustica e quale sia il criterio geometrico da rispettare per impedire che tale fenomeno si manifesti.



Generazione dell’ombra acustica da parte della balconata



Criterio per evitare che si generi l’ombra acustica

In pratica la regola progettuale da seguire si suddivide in due step:

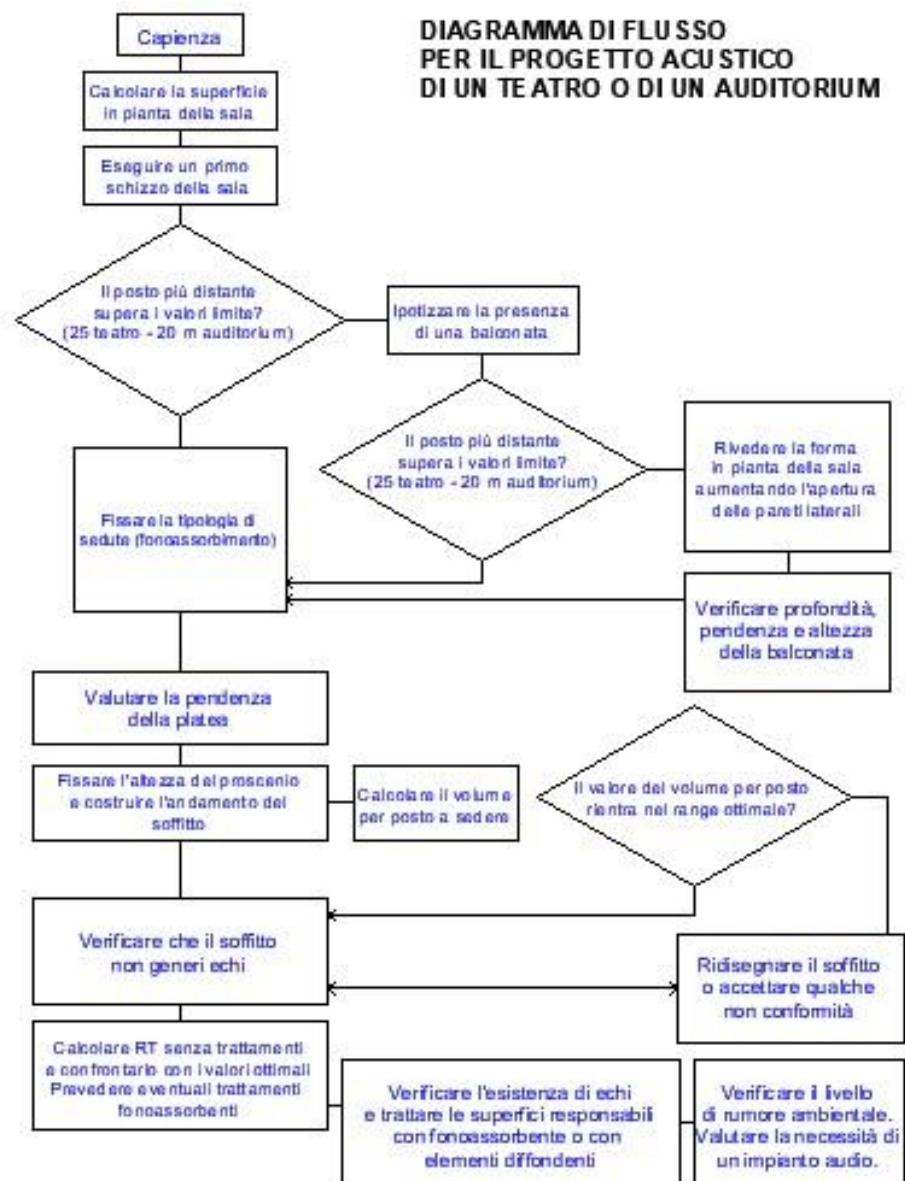
- A.** Il profilo inferiore della balconata deve presentare una pendenza “acusticamente positiva”, ossia tale da consentire ai raggi acustici di penetrare all’interno dello spazio sottostante la balconata stessa.
- B.** La balconata deve sporgere verso il palcoscenico per una distanza **D** mai superiore al doppio dell’altezza **H**, dove il significato di **D** e **H** è chiaramente mostrato nella figura precedente.

Esistono molti altri aspetti che necessiterebbero di essere trattati ed approfonditi, ma ciò va oltre gli scopi del presente modulo nel quale, lo ricordiamo, abbiamo limitato la nostra analisi ai soli ambienti destinati alla riproduzione della parola; è comunque bene ribadire il concetto che molti dei concetti e delle regole introdotte sono valide SOLAMENTE per questa tipologia di ambienti.

Tanto per fare un esempio, nel caso di una Sala da Concerti la forma a ventaglio della pianta è fortemente sconsigliata in quanto priva l'ambiente di gran parte del contributo delle riflessioni laterali, che invece forniscono un contributo assolutamente fondamentale per l'ascolto musicale.

Da ultimo è necessario sottolineare che la progettazione di una Sala per la Musica (Concert Hall, Opera House) rappresenta una delle sfide più complesse e critiche per il Progettista Acustico e richiede un livello di competenza ed esperienza molto elevato al punto che anche uno dei più grandi acustici di sempre, il Dott. Ing. Leo L. Beranek, autore di alcuni dei testi fondamentali dell'Acustica, fu vittima di un clamoroso fallimento nella progettazione di una grande sala da concerti.

In conclusione, nella pagina seguente forniamo un diagramma di flusso che sintetizza quella che potremmo assumere come procedura standard per la progettazione di una sala per il parlato.



A conclusione del presente modulo nel prospetto seguente riportiamo i valori di riferimento e/o i valori limite con cui ogni progettazione di ambienti destinati al parlato deve necessariamente confrontarsi.

Prospetto I

Ambiente	Parametro Acustico	Valori di riferimento	Fonte
Ambiente destinato al parlato	RT	$RT_{\text{ottimale}} = 0.32 \cdot \log_{10}(V) + 0.03$ Il valore di RT va rilevato ad ambiente NON occupato	UNI 11367 (2010)
	C ₅₀	$C_{50} \geq 0 \text{ dB}$	
	STI	$STI \geq 0.60$	
Uffici Open Space	D _{2,S}	Indice di attenuazione spaziale del parlato: $D_{2S} \geq 7 \text{ dB}$	UNI EN ISO 3382:3 (2012)
	L _{p,A,S,4 m}	Livello di pressione sonora ponderato A del parlato ad una distanza di 4 m: $L_{p,A,S,4 m} \leq 48 \text{ dB}$	
	r _D	Distanza di disattenzione: $r_D \leq 5 \text{ m}$	
Spazi commerciali con superficie lorda coperta superiore a 400 m ²	STIPA	Intelligibilità dei messaggi di emergenza ed evacuazione $STIPA_{\text{minimo}} \geq 0.45$ $STIPA_{\text{medio}} \geq 0.50$	UNI EN ISO 7240:19 (2010)

SOMMARIO DEL MODULO

1	Premessa: quale Sala?	3
2	Richiami di Acustica degli Ambienti Chiusi	5
2.1	Tempo di Riverbero	5
2.2	Intelligibilità	10
3	Sale per il Parlato	20
3.1	Dimensionamento di una sala per il parlato	23
3.2	Geometria di una sala per il parlato	32