

La qualità acustica delle sale

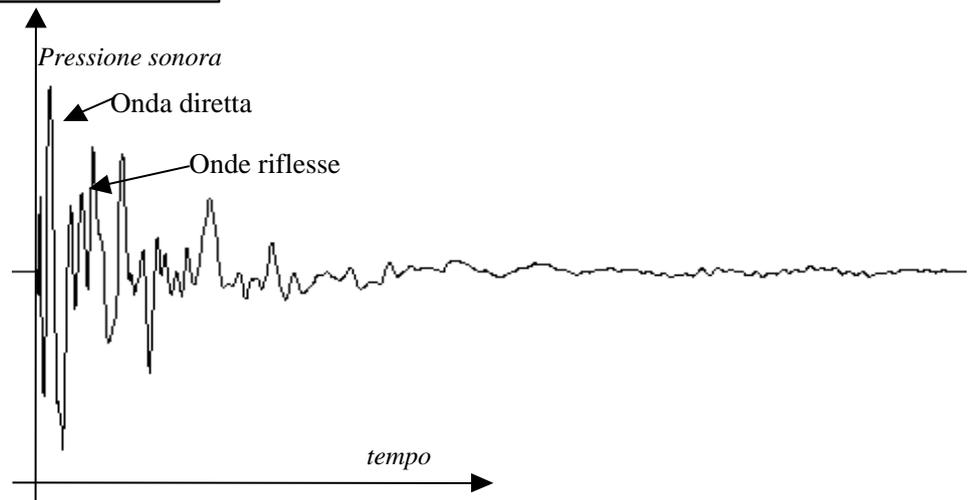
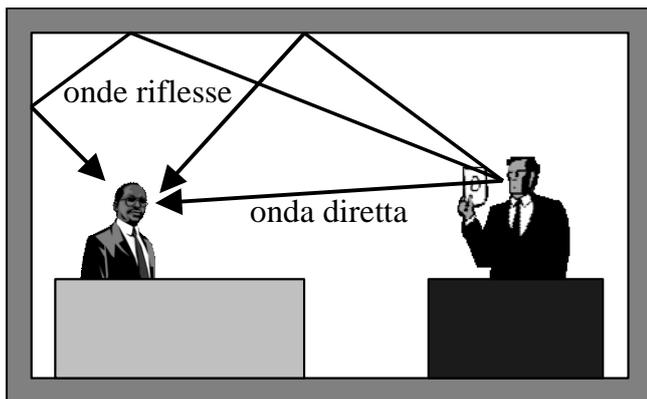
Simone Secchi

Dipartimento di Tecnologie dell'Architettura e Design "Pierluigi Spadolini"
Università degli Studi di Firenze

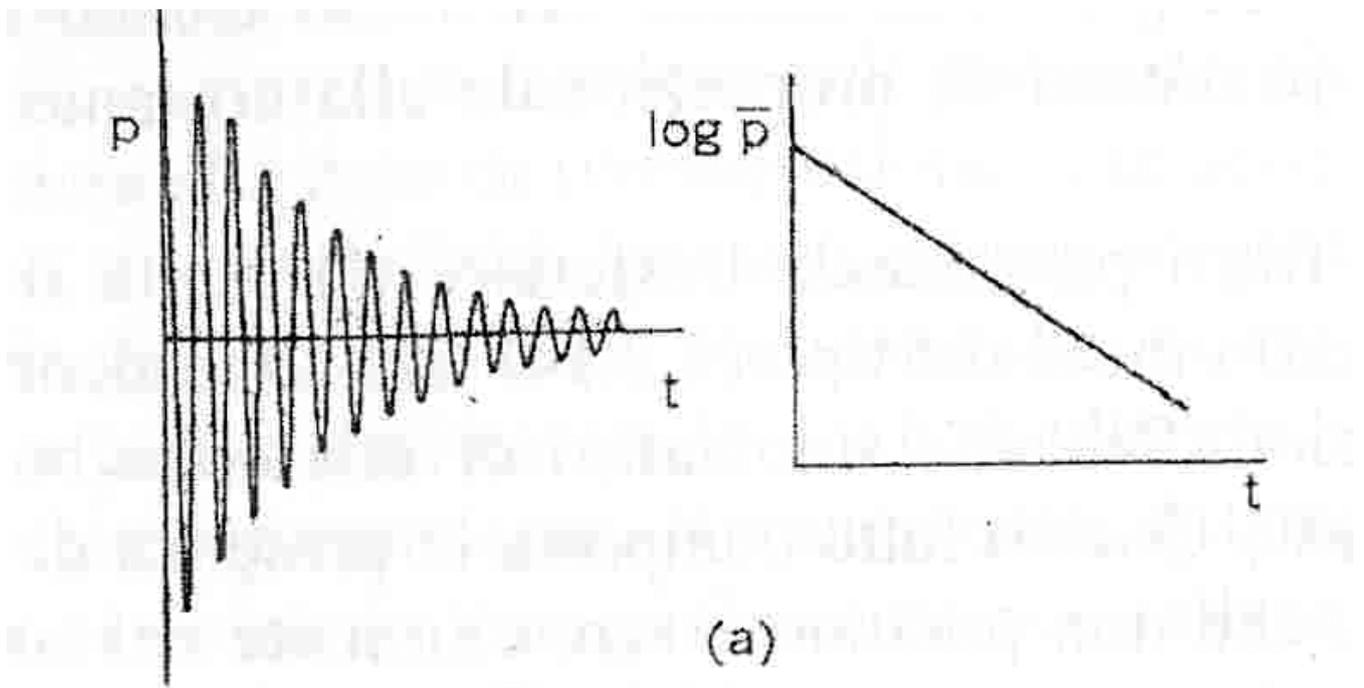
simone.secchi@unifi.it

http://www.taed.unifi.it/fisica_tecnica

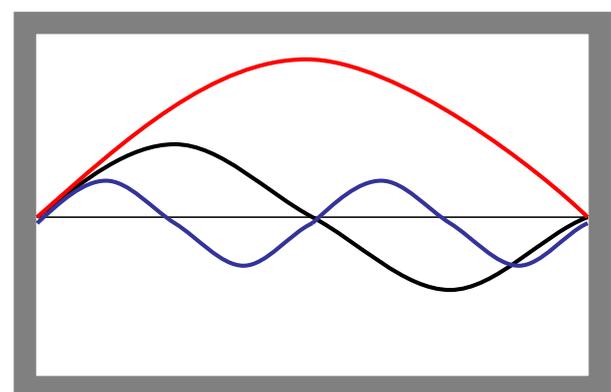
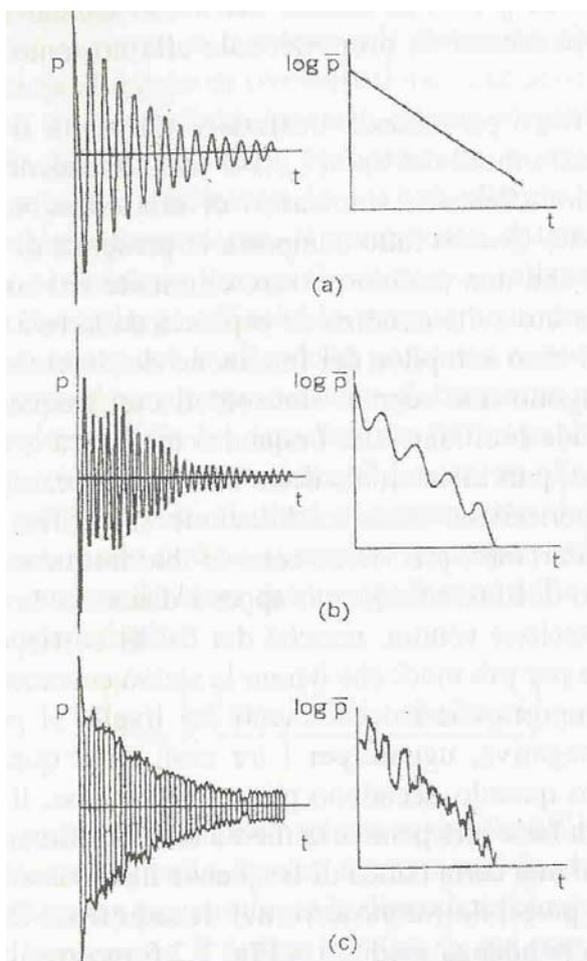
Le riflessioni sonore



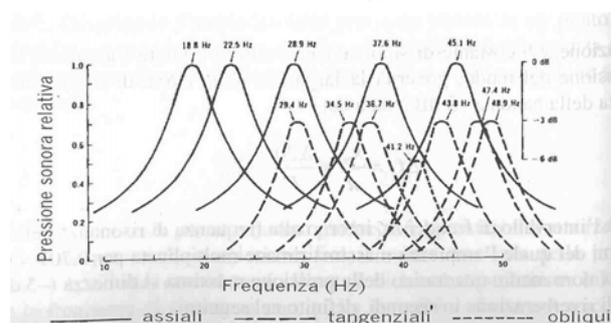
La curva di decadimento dei livelli sonori



I modi naturali di risonanza del volume



$$\lambda/2 = l_x$$



$$f_n = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (\text{Hz})$$

Il campo riverberante

Lo studio dei modi naturali di vibrazione è reso complesso dai fenomeni di assorbimento, diffrazione e riflessione obliqua delle onde sonore sulle superfici di confine della sala.

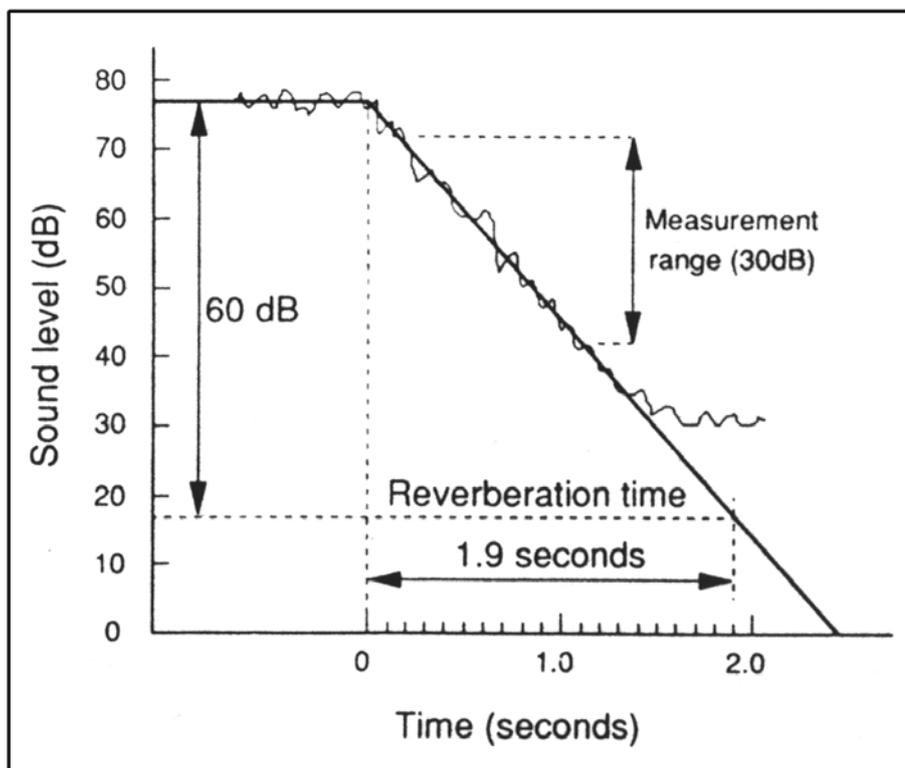
Inoltre, negli **ambienti** chiusi e **grandi** la **densità dei modi** è **molto elevata**.

Ciò comporta che in un ambiente chiuso e delimitato da superfici riflettenti la densità sonora nei vari punti tende ad essere costante.

Si viene pertanto a definire un **campo riverberante** in cui si assume che l'energia sonora provenga con uguale probabilità dalle varie direzioni.

Il tempo di riverberazione

Tempo impiegato al livello di pressione sonora per ridursi di 60 dB dopo che è cessata l'emissione da parte della sorgente sonora



Nei teatri, dove al di sopra della scena è presente un ampio volume per il controllo della scenografia, il grafico presenta tratti di pendenze discontinue a causa dell'interferenza di due riverberazioni distinte: quella della scena e quella della sala

La teoria di Sabine

$$T_{60} = 0.16 \frac{V}{S \cdot a_{Sab}}$$

Formula valida per ambienti non troppo grandi e che presentano valori del coefficiente medio di assorbimento piccoli\

$$a_{sab} (\alpha \text{ sabiniano}) \approx a_m$$

$$V < 10000m^3$$

$$a_m = \frac{S_1 \cdot a_1 + S_2 \cdot a_2 + \dots + S_n \cdot a_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n} \quad a_m < 0.3$$

Diversamente l'ipotesi dell'assorbimento continuo viene a cadere. Condizione contemplata nella **formula di Eyring** detta dell'*assorbimento discontinuo*.

$$T_{60} = 0.16 \frac{V}{S \cdot \ln \frac{1}{1 - a_m}}$$

Tempo di riverberazione ottimale

Scelta legata al **tipo di musica** cui è destinato l'ambiente ma anche al **volume**

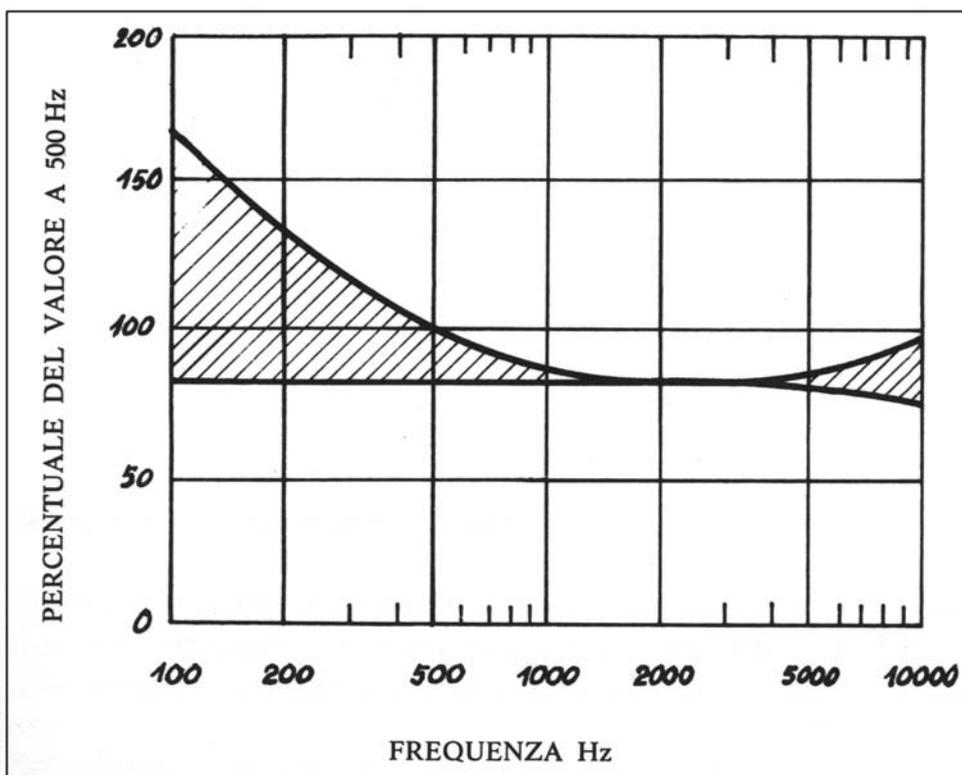
(spazi per la musica sinfonica sono pensati per ospitare più persone, mentre l'ascolto di quartetti, ad esempio, per loro natura richiedono ambienti più raccolti)

Volume m ³	Tempo di riverberazione τ_{60} in secondi	
	<i>musica</i>	<i>parola</i>
1000	0,99 ÷ 1,25	0,75 ÷ 0,92
2500	1,10 ÷ 1,45	0,83 ÷ 1,02
5000	1,25 ÷ 1,65	0,92 ÷ 1,12
10000	1,40 ÷ 1,85	0,99 ÷ 1,21
15000	1,50 ÷ 2,00	1,04 ÷ 1,27
20000	1,55 ÷ 2,10	1,08 ÷ 1,32
25000	1,60 ÷ 2,15	1,12 ÷ 1,38

Tempo di riverberazione ottimale (secondo Barron)

Musica per organo	Oltre 2.5 sec
Musica del periodo romantico	1.8 - 2.2 sec
Musica classica	1.6 - 1.8 sec
Opera	1.3 - 1.8 sec
Musica da camera	1.4 - 1.7 sec
Teatro	0.7 - 1.0 sec

Dipendenza dalla frequenza di T_{60}



Calcolo riferito alle frequenze principali.

Per la musica sinfonica si può pensare di calcolare il T_{60} alle frequenze di 125, 250, 500, 2000 Hz.

La valutazione secondo legge (DM 18/12/75)

Il **TEMPO DI RIVERBERAZIONE** deve essere riferito al volume dell'ambiente mediante il diagramma 1.

Il valore così ottenuto deve essere moltiplicato per i valori del diagramma 2 per ottenere i valori limite alla varie frequenze.

La verifica si esegue in funzione della frequenza alle bande di ottava caratterizzate da frequenza centrale di 250, 500, 1000 e 2000 Hz.

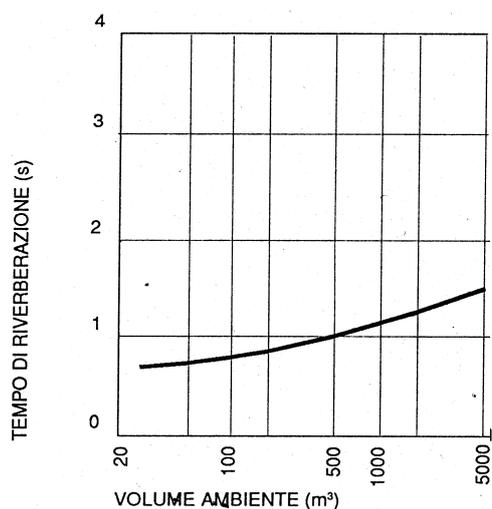


Figura 1

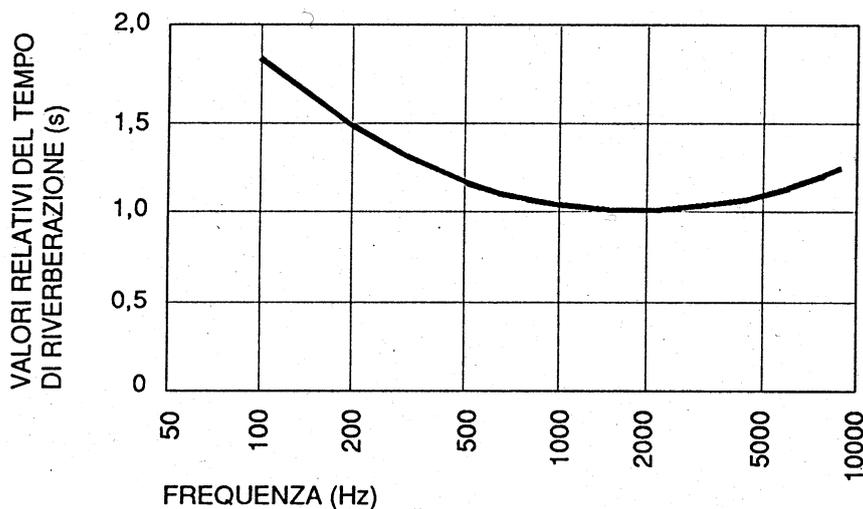


Figura 2

Il calcolo secondo la norma Pr EN 12354-6

$$T = \frac{0,16V}{A} \quad (\text{s})$$

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_{s,i} S_i + \sum_{j=1}^o A_{ogg,j} + \sum_{k=1}^p \frac{S_k}{S_{config,k}} A_{config,k} + A_{air} \quad (\text{m}^2)$$

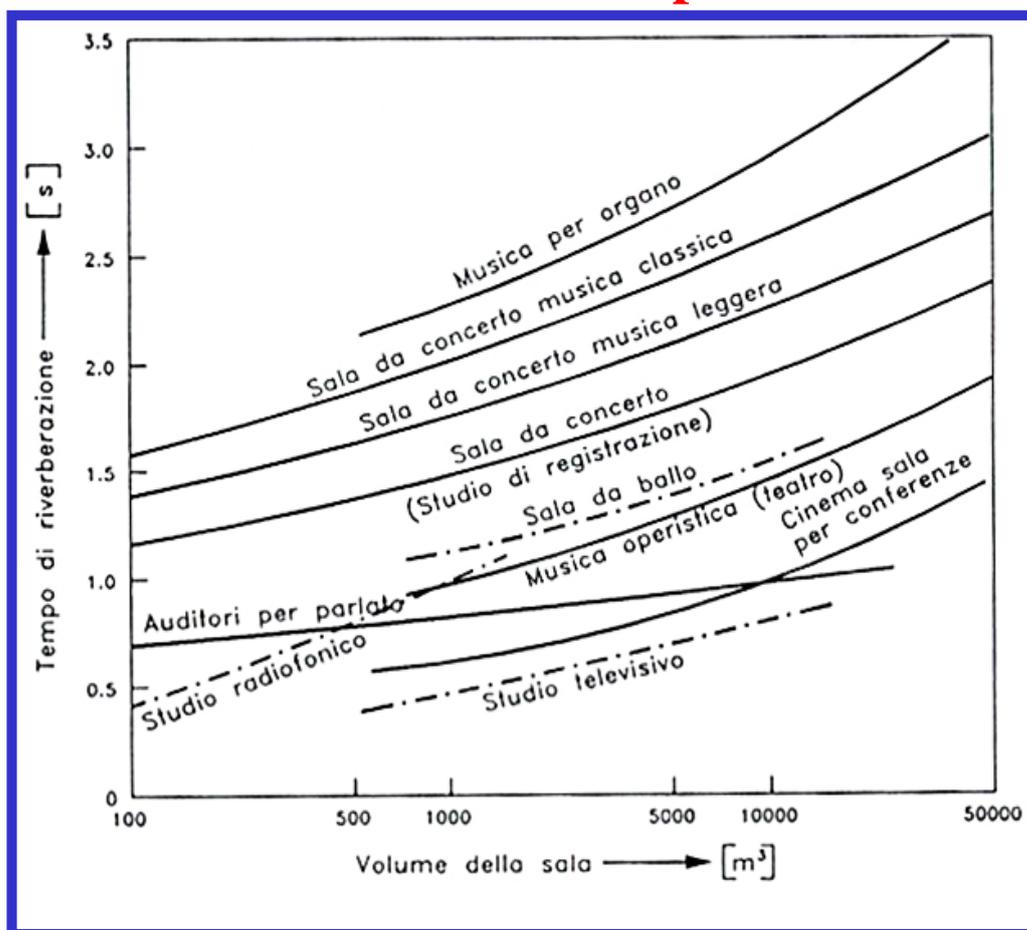
α_s = coefficiente di assorbimento della superficie i di area S ;

A_{ogg} = assorbimento equivalente dell'oggetto j ;

A_{config} = assorbimento equivalente della configurazione di oggetti k , che copre una superficie in pianta S nel caso reale e S_{config} nella prova in laboratorio;

A_{air} = assorbimento equivalente dell'aria.

Valori raccomandati del tempo di riverberazione



Presenza di pubblico nella sala

Calcolo del tempo di riverberazione nei tre casi di *auditorio completo*, *ridotto a 3/4* e *vuoto*

$\tau_{60, completo}$

$\tau_{60, 3/4}$

$\tau_{60, vuoto}$

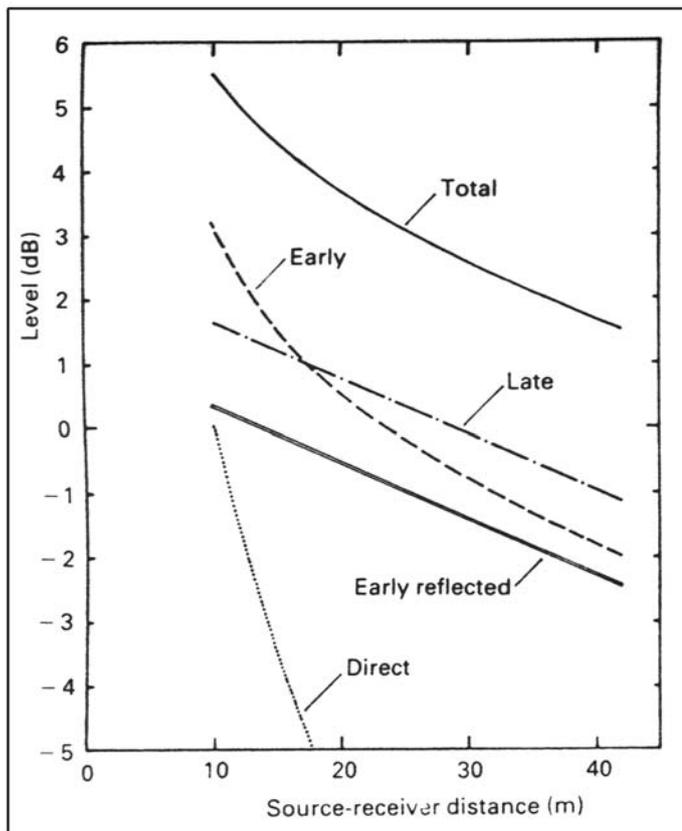
L'optimum di riverberazione dovrebbe essere raggiunto a sala vuota o a 3/4 di occupazione

Questo per il motivo che raramente una sala per concerti raggiunge il pieno affollamento

L'uniformità dei tempi di riverberazione in condizione diversa di affluenza del pubblico può essere ricercata attraverso l'utilizzo di poltrone aventi un coefficiente di assorbimento tale che, in caso di non occupazione da parte di una persona, eguagli o si avvicini alla condizione di occupazione.

Il ritardo delle prime riflessioni

(*early sound e late sound*)



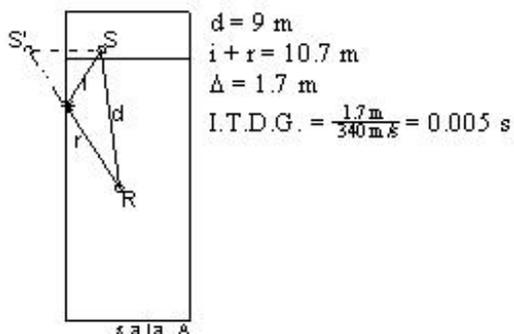
Da un punto di vista psicoacustico durante un'esecuzione musicale, l'*early sound* contribuisce alla *chiarezza* e alla definizione del suono, mentre il *late sound* crea il *sostegno* sonoro sul quale il suono diretto e le prime riflessioni vengono distinte dall'orecchio.

comportamento di una sala di media grandezza

Il tempo di ritardo iniziale

(Initial-Time-Delay-Gap)

“The greater the time delay of the reflection, the less pleasant the music becomes” (Beranek)



Differenza tra il tempo impiegato dal primo raggio riflesso a raggiungere un dato ascoltatore e quello impiegato dal raggio diretto.

Problema solitamente associato ad una sala dal grande volume.

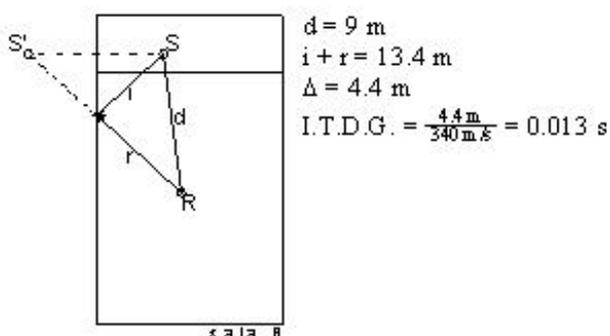
Secondo Beranek valore ottimale del tempo iniziale di ritardo dell'ordine di

25 millisecondi.

Ottenimento di questo valore spesso difficile per le dimensioni delle grandi sale per musica sinfonica odierne.

Studi sperimentali compiuti nelle nuove sale riscontrano valori dell' I.T.D.G. prossimi a

30 millisecondi.



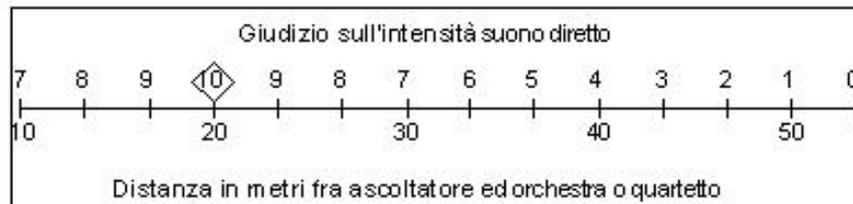
Intensità del suono diretto

È influenzata da:

- distanza dell'ascoltatore dall'esecutore o dagli esecutori
- direttività della sorgente nel caso di soli
- numero dell'organico dell'orchestra
- natura delle superfici riflettenti della parte emittente del podio
- presenza o meno di pubblico
- pendenza del piano di platea

La distanza massima accettabile è dell'ordine dei 25÷30 m per il parlato e di 45÷50 m per la musica.

Per distanze superiori, la componente del suono diretto può essere rinforzata mediante **pannellature riflettenti** disposte variamente sul soffitto o appese al di sopra degli esecutori.



Grazing absorption (assorbimento del pubblico)

La percezione del suono diretto proveniente dal palco e indirizzato verso la platea è influenzata dalla presenza del pubblico antistante il ricevente.

Tale fenomeno può essere attenuato creando un andamento della pendenza della platea molto favorevole dal punto di vista della visibilità o enfatizzando il valore del tempo di riverberazione.

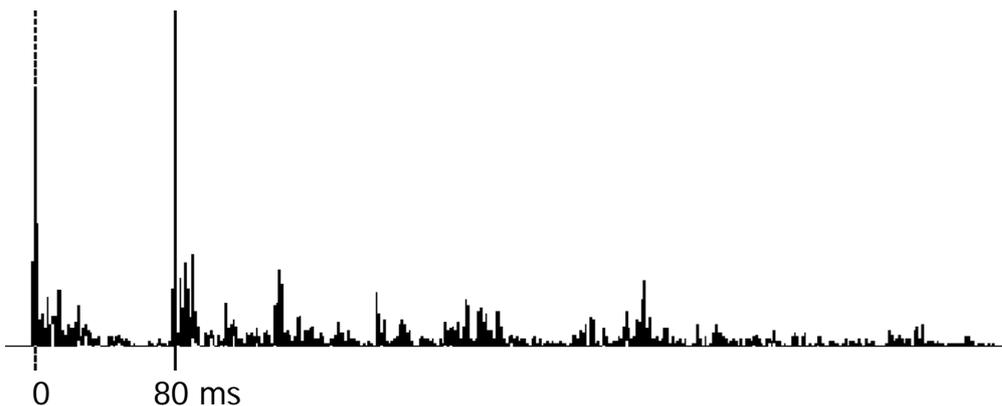
Chiarezza e definizione del suono

Si possono definire queste due qualità come **l'assoluta mancanza di offuscamento dei suoni susseguenti**.

Quattro sono i fattori che favoriscono chiarezza e definizione:

- Basso Initial-Time-Delay-Gap
- Sufficiente intensità del suono diretto relativamente ad ogni seduta
- Giusto equilibrio tra l'intensità del suono diretto e quella del suono riverberato
- Assoluta assenza di fenomeni di eco

Indice di Chiarezza (C_{50} e C_{80})



$$C_{80} = 10 \text{Log} \frac{\int_{0ms}^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt}$$

Valori ottimali per chiarezza

$$-1.6 < C_{80} < +1.6 \text{ (dB)}$$

(gruppo di Dresda)

$$-2 < C_{80} < +2 \text{ (dB)}$$

(altri autori per musica sinfonica)

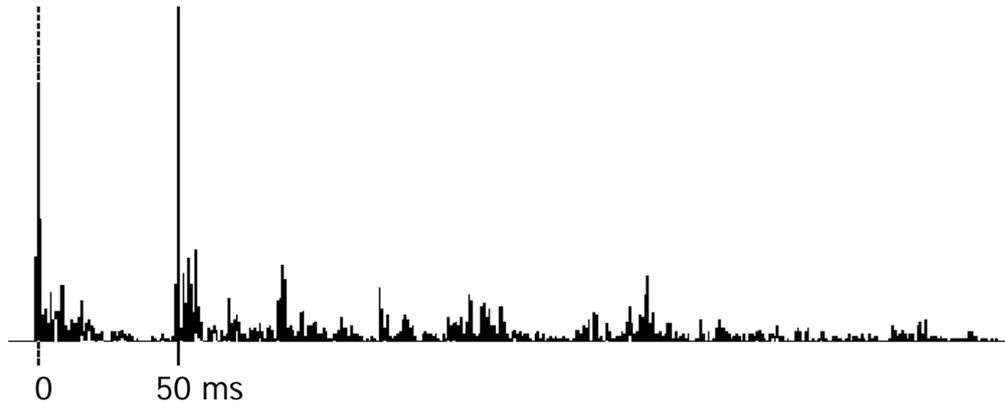
$$0 < C_{80} < +4 \text{ (dB)}$$

(musica lirica)

$$C_{50} > +3 \text{ (dB)}$$

(parlato)

Indice di Definizione



Criterio del tutto simile a quello del C50-C80.

È il rapporto tra la frazione dell'energia che perviene nei primi 50 ms e tutta l'energia pervenuta all'orecchio dell'ascoltatore:

Valore ottimale

$D \cong 0.34$

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

Ensemble (*accordo*)

Qualità riferita alla **reciproca udibilità degli strumenti tra di loro**.

Nella musica amplificata (pop, Jazz ...) spesso i musicisti necessitano di strumenti localizzati di amplificazione (spie) per rendergli possibile il chiaro discernimento del suono prodotto dagli altri componenti.

Nella musica non amplificata, deve comunque essere assicurata un buona reciproca udibilità.

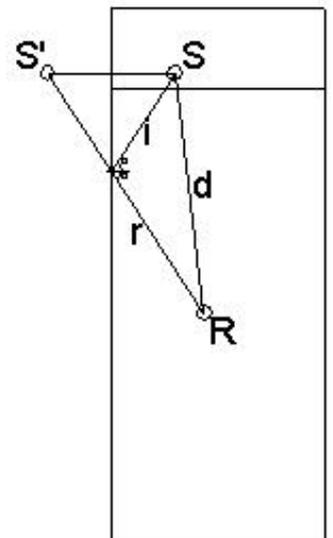
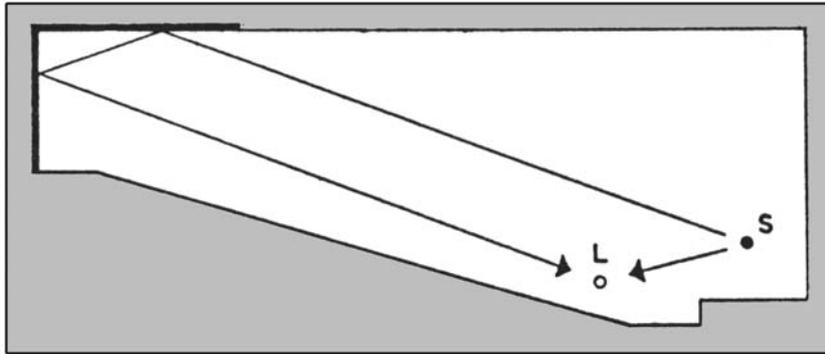
È possibile anche sottolineare acusticamente le gerarchie e le dipendenze esistenti all'interno di una orchestra.

Ad esempio viole e violoncelli devono poter chiaramente udire l'esecuzione del primo violino e naturalmente il direttore deve essere messo nella condizione di poter seguire il comportamento di ciascun musicista.

Eco

Fenomeno dovuto alla particolarità dell'orecchio umano di percepire distintamente due suoni brevissimi se vengono ricevuti distanziati da un intervallo di circa **50 millisecondi**.

Il fenomeno dell'eco si ha in ambiente riverberante quando tra la percezione del suono diretto e quella del primo suono riflesso trascorre un tempo almeno di 50 millisecondi.



$$\frac{(i+r)-d}{340} \leq 0.05$$

Eco

Per eliminare problemi di eco è necessario che:

- non troppa energia sonora venga orientata verso il fondo della sala
- le riflessioni di medio ritardo siano fornite all'orchestra e alle prime file della platea da irregolarità di superficie del soffitto e delle pareti laterali

Anche in una sala notevolmente larga si possono raggiungere valori ridotti dell'I.T.D.G attraverso la **sospensione al soffitto di pannelli riflettenti**.

La **tromba** è uno strumento che può generare fenomeni di eco nella sala. Infatti, è caratterizzata da una notevole potenza (soprattutto negli staccati) ed ha una forte direttività.

Si deve quindi fare in modo che la sezione degli ottoni sia collocata in punti del podio tali che la direzione di propagazione del suono da loro generato non sia orientata verso superfici riflettenti.



Distorsione del suono

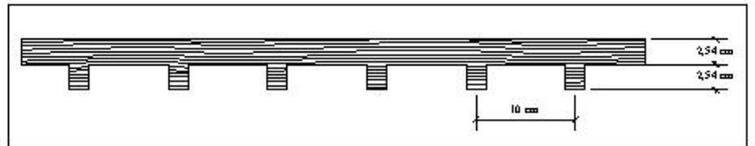
Fenomeno che può generare note che l'orchestra non ha suonato o sopprimerne alcune.

La prima causa è la presenza di materiali di rivestimento ad assorbimento selettivo.

In presenza di un numeroso pubblico questo fenomeno è trascurabile, ma a sala vuota rende impossibile l'utilizzo dell'ambiente per registrazioni di qualità.

Un'altra causa dell'insorgenza della *distorsione* è la presenza di elementi fisici risuonanti a certe frequenze .

Esempio di grigliato di montanti e traversi in listelli di legno che risuona ad una specifica frequenza. Si può risolvere il problema facendo in modo che la profondità di ogni quadratura vari in modo casuale.



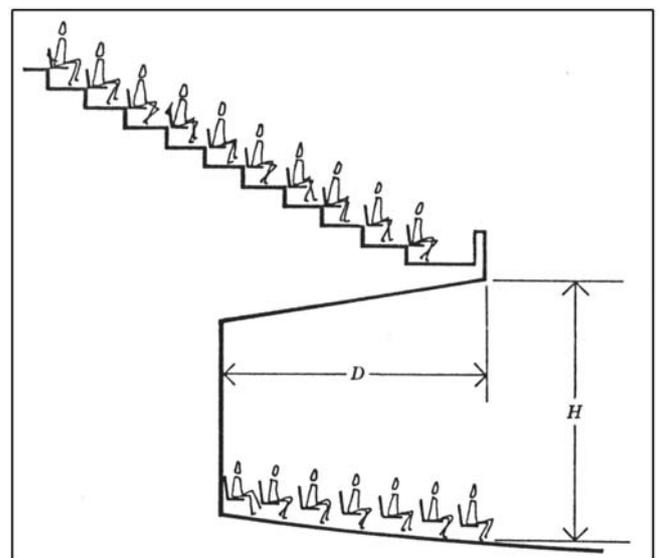
Non-uniformità dell'intensità sonora

Critica per:

poltrone inserite nelle logge laterali
si deve assicurare una soddisfacente riflessione delle onde sonore all'interno,

poltrone poste sotto le balconate
la profondità non dovrebbe eccedere la distanza tra il pavimento e l'intradosso della balconata ($D \leq H$).

Nelle sale per l'opera il valore ammesso per la profondità arriva a $2H$ dal momento che per tali manifestazioni non è richiesta una fedeltà tanto alta quanto per le sale da concerto.



Valori di riferimento

Nome	Espressione analitica	Valori di riferimento
Tempo di riverberazione di Sabine T_{60}	$T_{60} = \frac{0,161V}{A}$	lettura, dramma: $0 < T_{60} < 1$ s teatri d'opera: $1,2 < T_{60} < 1,8$ s sale per musica da camera: $1,4 < T_{60} < 2$ s grandi sale da concerto: $1,7 < T_{60} < 2,3$ s chiese: $2 < T_{60} < 4$ s
Tempo di primo decadimento (<i>Early Decay Time, EDT</i>) T_{10}	calcolato attraverso la retta di regressione lineare	$1,8 < T_{10} < 2,6$ s
Equilibrio tonale (<i>Tonal Balance</i>) T_B	$T_B = \frac{T_{10}(2\text{kHz})_{\text{ott}} - T_{10}(250\text{Hz})_{\text{ott}}}{3}$	$T_B \rightarrow 0$ s
Tempo di riverberazione iniziale (<i>Initial Reverberation Time, IRT</i>) T_{15}	calcolato attraverso la retta di regressione lineare	
Tempo di riverberazione iniziale (ANZ) T_{20}	calcolato attraverso la retta di regressione lineare	
Rapporto dei bassi (<i>Bass Ratio</i>) BR	$BR = \frac{T_{60}(125\text{Hz})_{\text{ott}} + T_{60}(250\text{Hz})_{\text{ott}}}{T_{60}(500\text{Hz})_{\text{ott}} + T_{60}(1\text{kHz})_{\text{ott}}} = \frac{T_{60}(125\text{Hz})_{\text{ott}} + T_{60}(250\text{Hz})_{\text{ott}}}{2T_{\text{med}}}$	$1,2 \leq BR \leq 1,25$
Tempo di riverberazione alle frequenze medie	$T_{\text{med}} = \frac{T_{60}(500\text{Hz})_{\text{ott}} + T_{60}(1\text{kHz})_{\text{ott}}}{2}$	orchestra sinfonica media: $T_{\text{med}} = 1,9$ s opera italiana: $T_{\text{med}} = 1,5$ s opera wagneriana: $T_{\text{med}} = 1,7$ s

Valori di riferimento

Nome	Espressione analitica	Valori di riferimento
Chiarezza a 80 ms (<i>Clarity</i>) C_{80}	$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{80\text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt}$	parlato: $C_{80} \geq 3$ dB musica: $-4 \leq C_{80} \leq 2$ dB
Chiarezza a 50 ms C_{50}	$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{50\text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt}$	
Definizione D	$D = \frac{\int_0^{50\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$	parlato: $D > 0,5$ musica: $D < 0,5$
Tempo del punto di gravità o Istante baricentrico dell'energia o Tempo centrale t_s	$t_s = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$	parlato: $0 \leq t_s \leq 50$ ms musica: $50 \leq t_s \leq 250$ ms
Massa della sala R_M	$R_M = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{50\text{ms} \int_0^{\infty} p^2(t) dt} \pm 10 \log \left(\frac{1-D}{D} \right) = -C_{50}$	

Materiali fonoassorbenti

Si classificano in:

materiali porosi, risonatori acustici, pannelli vibranti, sistemi misti.

Valori del coefficiente di assorbimento di componenti

Descrizione	Frequenza (1/1 ott, Hz)					α_w
	250	500	1000	2000	4000	
Lana di legno mineralizzata, spessore 25 mm, applicato a contatto con la parete	0.10	0.30	0.70	0.50	0.50	0.3
Lana di legno mineralizzata, spessore 35 mm, applicato a contatto con la parete	0.15	0.25	0.50	0.90	0.65	0.3
Lana di legno mineralizzata, spessore 50 mm, applicato a contatto con la parete	0.25	0.65	0.60	0.55	0.90	0.5
Gesso rivestito, spessore 13 mm, 18% di superficie perforata, a 200 mm dal soffitto	0.75	0.78	0.64	0.60	0.58	0.6
Gesso rivestito, spessore 13 mm, 18% della superficie perforata, a 58 mm dal soffitto	0.40	0.63	0.82	0.64	0.43	0.6
Linoleum	0.10	0.10	0.09	0.10	0.12	0.1
Moquette	0.05	0.10	0.20	0.40	0.81	0.1
Poliuretano espanso, 30 kg/m ³ , spessore 13 mm	0.11	0.40	0.90	0.90	0.82	0.4
Poliuretano espanso, 30 kg/m ³ , spessore 51 mm	0.12	0.25	0.55	0.88	0.96	0.3
Poliuretano espanso, 30 kg/m ³ , spessore 6 mm	0.30	0.62	0.90	0.99	0.98	0.5
Sedia di metallo	0.015	0.030	0.035	0.025	0.035	0
Sedia imbottita	0.23	0.37	0.27	0.25	0.25	0.3
Sughero	0.04	0.08	0.12	0.03	0.10	0.1
Sughero espanso, 80 kg/m ³ , in pannelli da 25 mm, aderente alla parete	0.04	0.08	0.12	0.03	0.10	0.1
Tappeto pesante	0.20	0.25	0.30	0.30	0.30	0.3
Tappeto sottile	0.10	0.15	0.20	0.20	0.20	0.2

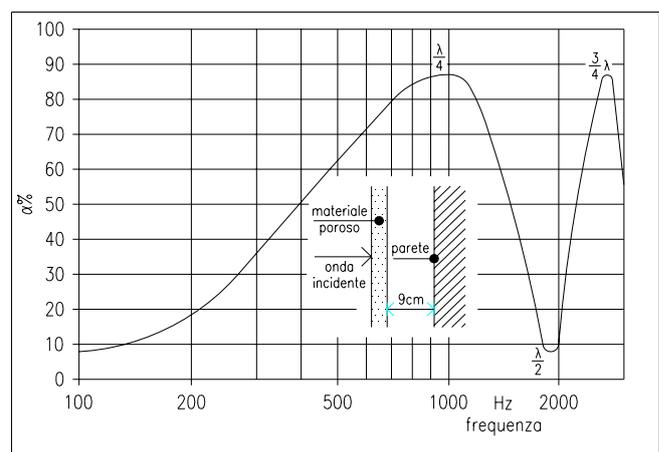
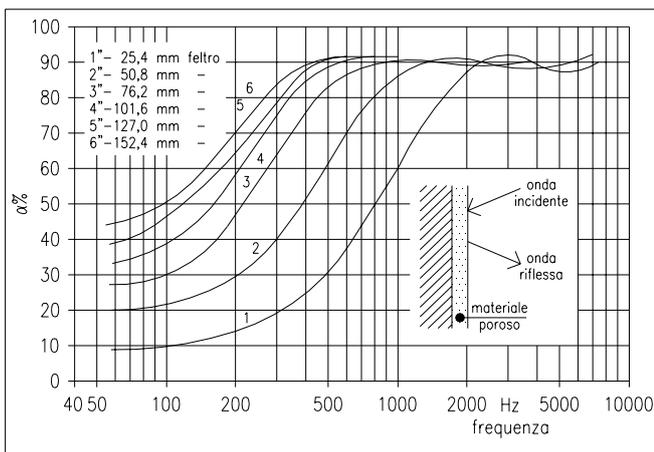
Materiali porosi

Assorbimento acustico determinato dalla conversione in calore dell' energia meccanica dell'onda incidente.

Assorbimento acustico dipendente dalla lunghezza d'onda del suono incidente, dal rapporto tra il volume dei vuoti e quello totale e dallo spessore del materiale

Assorbimento in genere aumenta con la frequenza e con lo spessore dello strato di materiale.

Modalità di installazione influenzano l'assorbimento acustico: dove la velocità è massima si ha il massimo di dissipazione della energia sonora in calore e quindi il massimo assorbimento acustico.



Risuonatori acustici

Schematizzato come una cavità comunicante con l'esterno attraverso un foro praticato su di una parete non troppo sottile (collo del risuonatore).

L'aria contenuta nel collo si comporta come un pistone oscillante; quella nella cavità costituisce l'elemento elastico del sistema.

Massimo assorbimento alla frequenza di risonanza

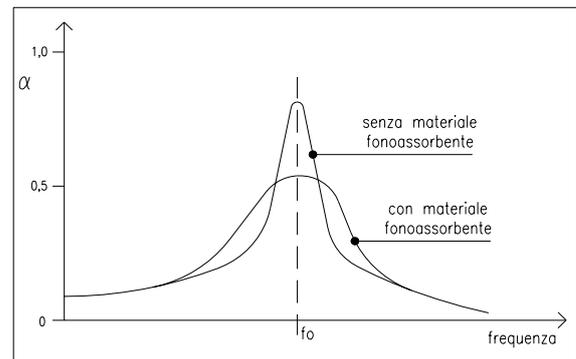
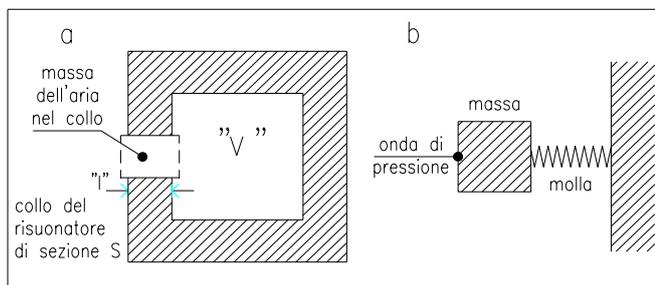
$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi r^2}{V(l + 1.6r)}}$$

c_0 = velocità di propagazione del suono nel mezzo (m/s);

r, l = raggio e la lunghezza del collo del risuonatore (m);

V = volume della cavità (m^3).

Possibile realizzare risuonatori con frequenza di risonanza bassa: diventano complementari dei materiali porosi.



Pannelli vibranti

Costituiti da pannelli rigidi piani, disposti ad una certa distanza dalla parete.

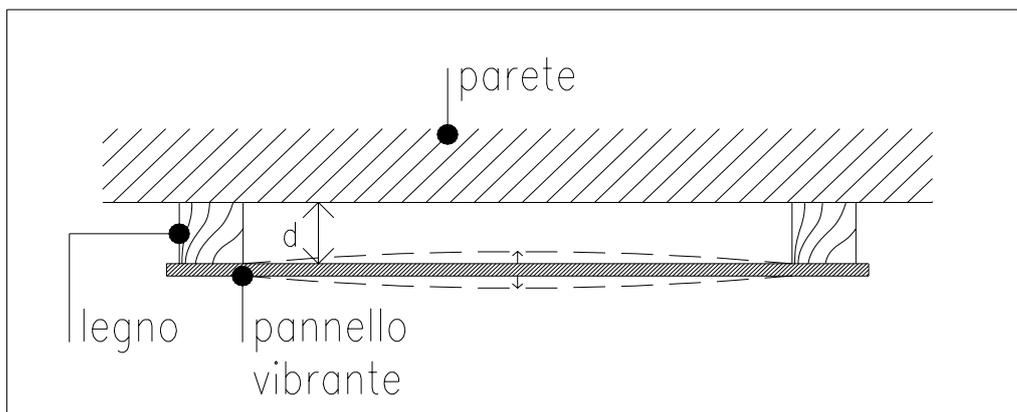
Possono essere assimilati a masse oscillanti (il pannello) accoppiata ad un elemento elastico (l'aria racchiusa nell'intercapedine).

Massimo assorbimento alla frequenza di risonanza

$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{(\sigma d)}}$$

σ = densità superficiale del pannello (kg/m^2);

d = distanza del pannello dalla parete (m).



Attenuazione dei rumori mediante fonoassorbimento

Quando la sorgente del disturbo si trova nello stesso locale in cui è l'ascoltatore, si potrà diminuire il livello sonoro:

- riducendo la potenza sonora della sorgente;
- allontanando l'ascoltatore dalla sorgente ($>r$);
- riducendo l'energia riflessa dalle pareti di confine (aumentando l'area equivalente di assorbimento acustico delle superfici esposte al campo acustico).

Nell'ipotesi di campo acustico riverberante si ottiene facilmente il valore dell'attenuazione del livello sonoro (ΔL):

$$DL(f) = 10 \cdot \log\left(\frac{A_2}{A_1}\right)$$

dove "A" rappresenta l'area equivalente di assorbimento acustico delle pareti che delimitano l'ambiente;

1 e 2 indicano i valori prima e dopo il trattamento acustico delle pareti.

Raddoppiando il valore di A_1 si ottiene una riduzione del livello sonoro di 3 dB;

Per ottenere un'attenuazione di 10 dB si deve aumentare di 10 volte il valore dell'area di assorbimento equivalente.

Questo è possibile, in pratica, solamente quando il valore di A_1 è molto piccolo (ambiente inizialmente con pareti molto riflettenti).

Nelle normali situazioni si possono ottenere attenuazioni massime di livello sonoro di 7-8 dB.

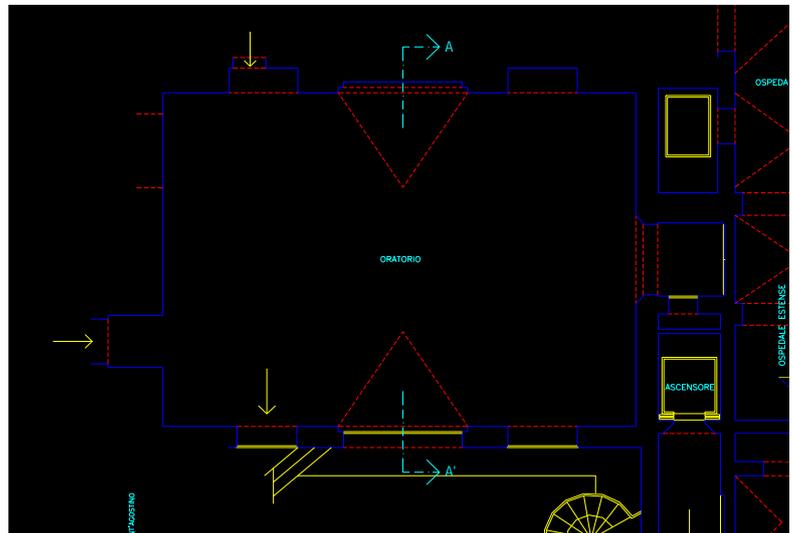
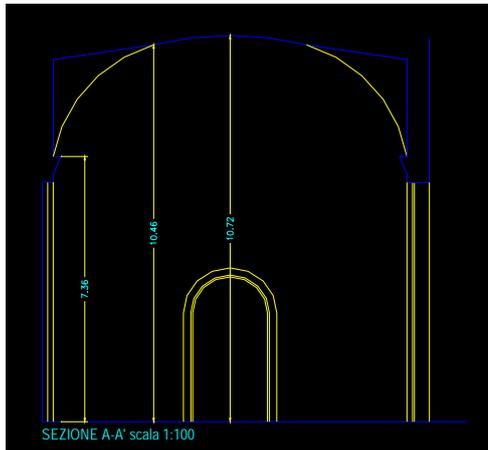
La situazione degli edifici scolastici nella provincia di Firenze (dati ARPAT)

Scuole materne ed elementari Indagine primi anni 90		
Tempo di riverberazione		
	Aule	Refettori
> dei limiti	70%	90%
> 2X limiti	10%	35%

Esempio di correzione acustica di un ambiente ad uso aula universitaria

Ambiente storico adibito ad aula magna dell'Università

Impossibilità di intervenire liberamente sul rivestimento delle superfici interne



Esempio di correzione acustica di un ambiente ad uso aula universitaria

Caratteristiche dimensionali dell'ambiente

Superficie in pianta della sala: » 122 m²

Altezza media della sala: 0 m

Volume della sala: 1220 m³

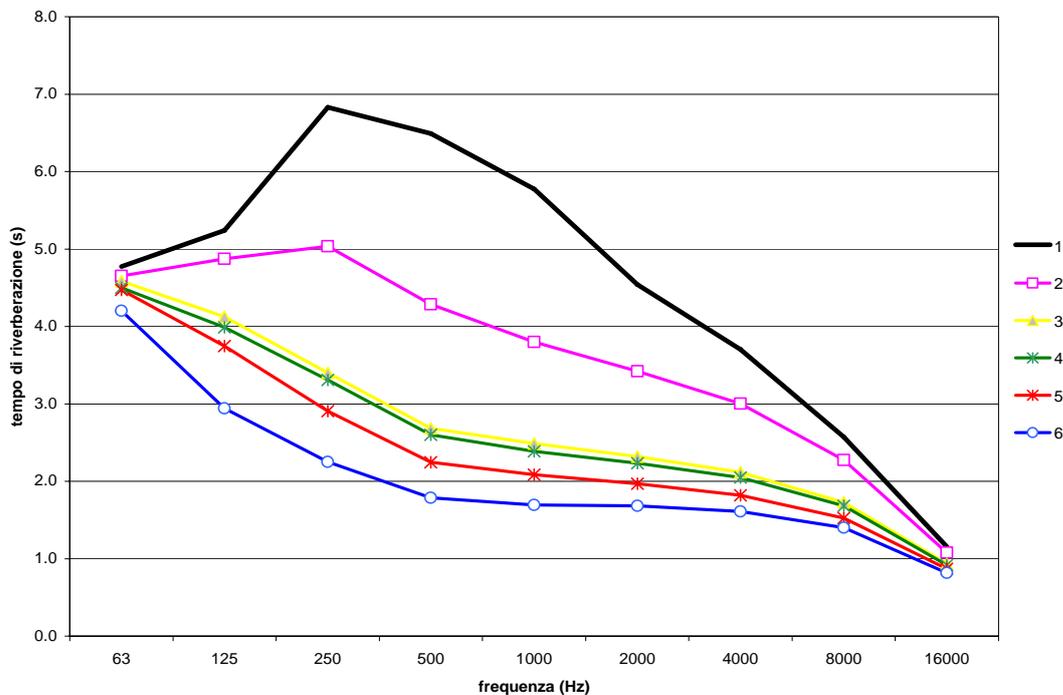
Superfici laterali: 450 m² (di cui circa 35 m² di finestre).



Valori raccomandati dei diversi parametri

Parametro	Valori raccomandati	Valore a 500 Hz medio
Tempo di riverberazione (RT) (s)	RT < 1,5 s	6,5
Rapid Speech Transmission Index (RASTI)	STI > 0,5	0,35
Speech Transmission Index (STI)	RASTI > 0,5	0,33

Risultati delle simulazioni per le diverse ipotesi di intervento



1: stato attuale (misurato);

2: con aggiunta di **tende pesanti su tutte le vetrate esterne**;

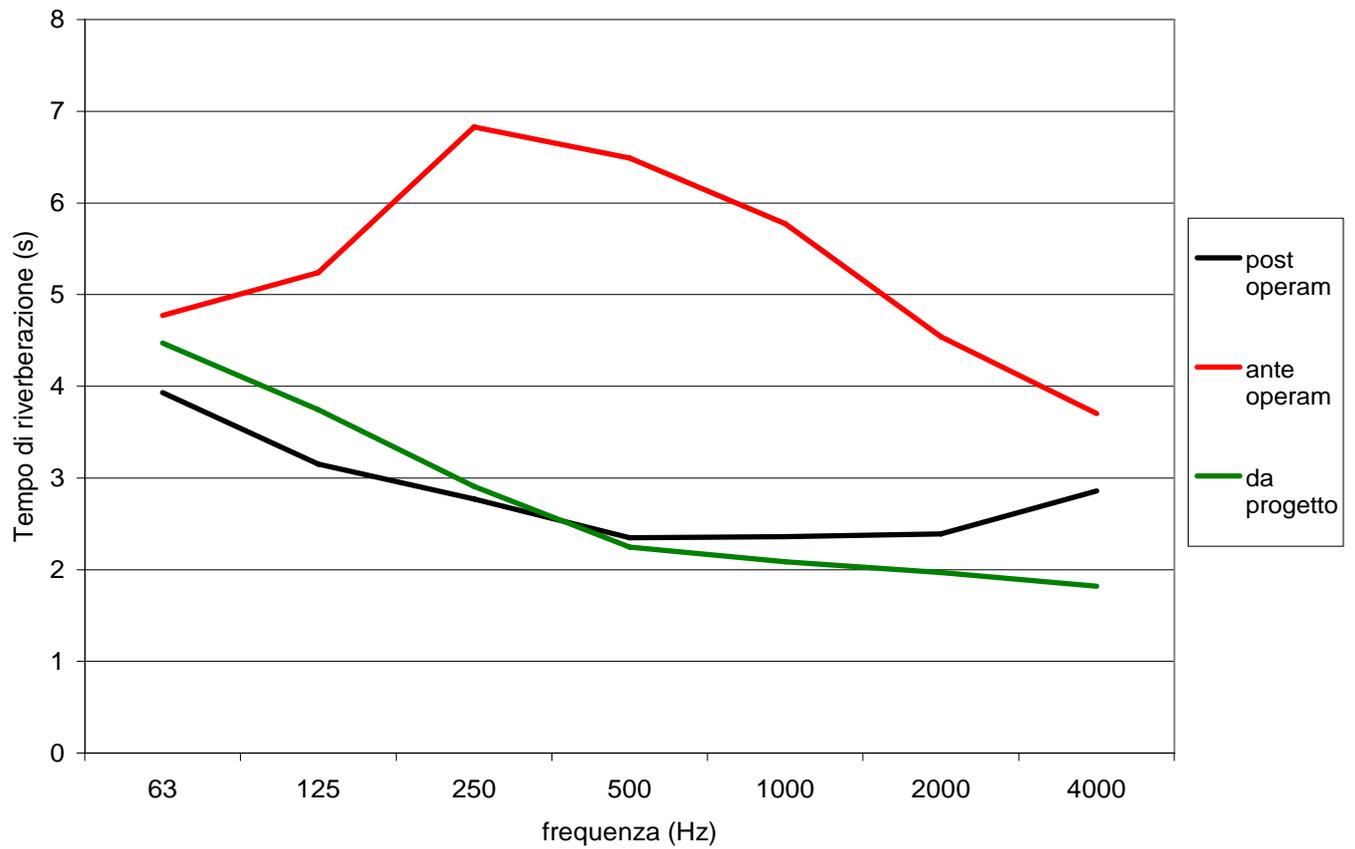
3: come 2 ed aggiunta di **materassini in lana di roccia** spessa 50 mm rivestita in stoffa **nelle nicchie** contrapposte alle finestre;

4: come 3 ed aggiunta di **sedie in legno** in numero complessivo di 80;

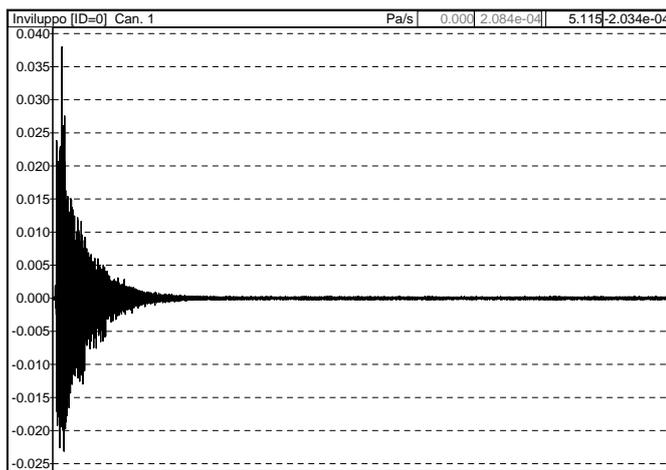
5: come 4 ed aggiunta di **materassino in lana di roccia** da 50 mm per tutta la superficie orizzontale del **cornicione**;

6: come 5 ed aggiunta di 2 baffles di 1 x 7 metri ciascuno, in lana di roccia da 50 mm rivestita con lamiera microforata.

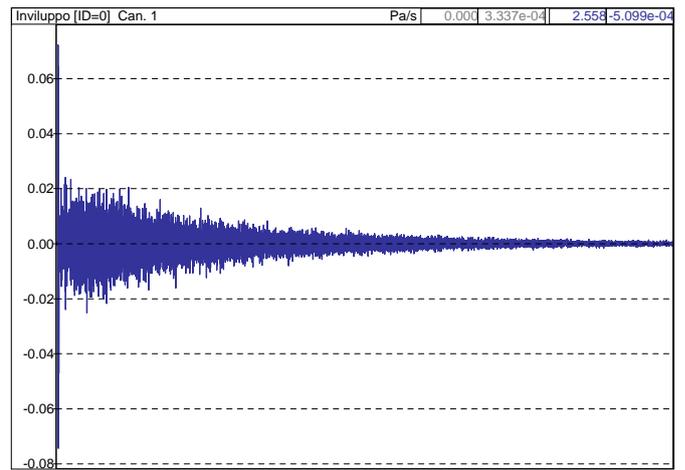
Risultati delle verifiche strumentali



Confronto sulla risposta acustica della sala



Ante operam



Post operam



Esempio di simulazione di risposta acustica di una sala

Mediante la tecnica della *convoluzione* dei segnali acustici è possibile simulare il modo in cui verrebbe ascoltato un generico brano nella sala oggetto di studio.

La sala deve essere studiata mediante la misura o il calcolo della risposta impulsiva.

Dalla *convoluzione* di questa risposta impulsiva con un generico brano registrato in una *sala anecoica*, cioè priva di riverbero, si ottiene la simulazione del brano come verrebbe ascoltato nella sala oggetto di studio.



Brano anecoico



Brano convoluto