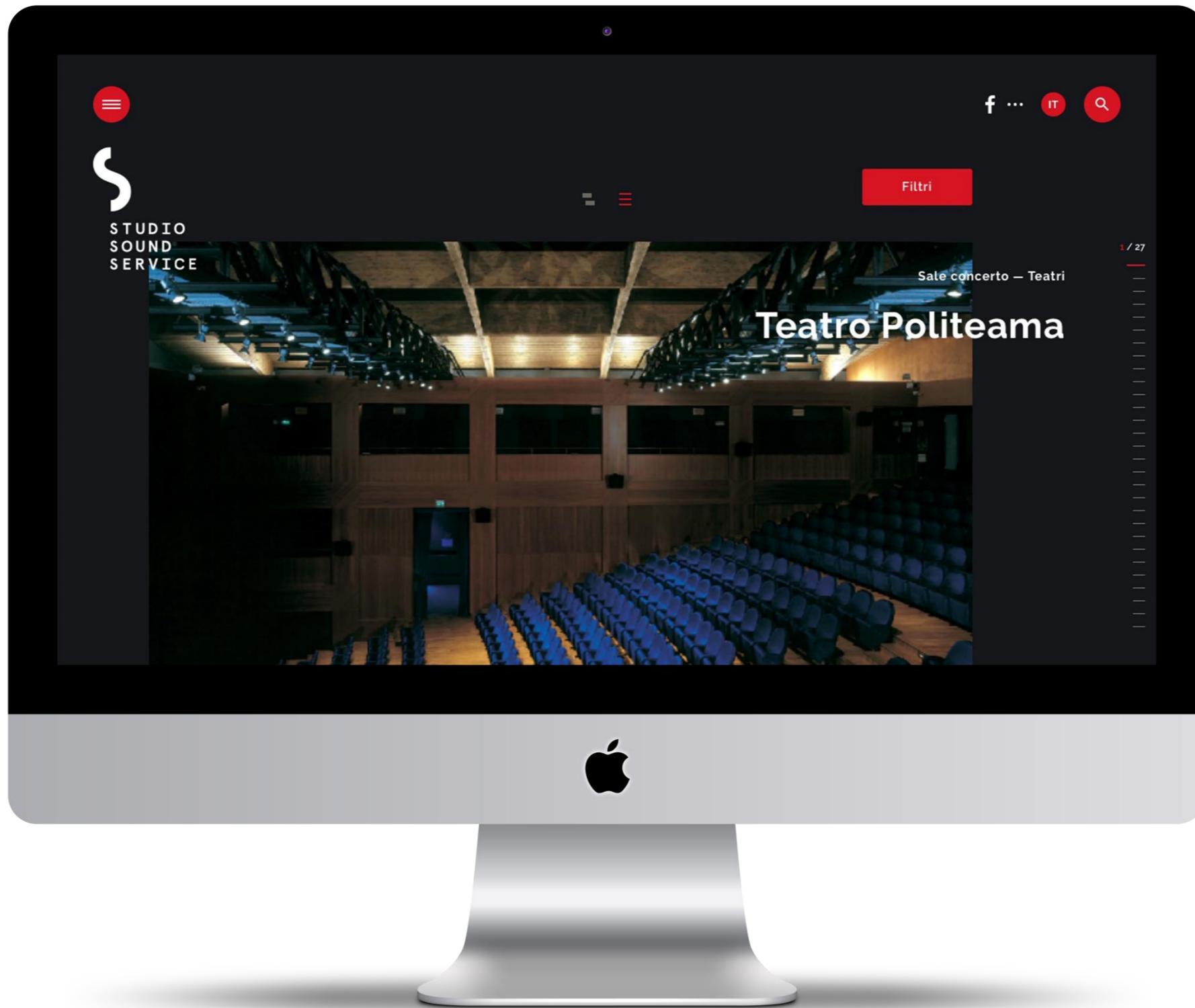


“Misure in opera dei parametri acustici all’interno della chiesa di San Giovanni Battista con confronto di metodi e strumentazioni diverse”

**Hotel The Gate e Chiesa di San Giovanni Battista
Sesto Fiorentino 7 Ottobre 2022**



www.studiosoundservice.com



DONATO MASCI - LUCA TOMMASI
WWW.STUDIOSOUNDSERVICE.COM

Portfolio

300+ recording and audio-video (post)production facilities

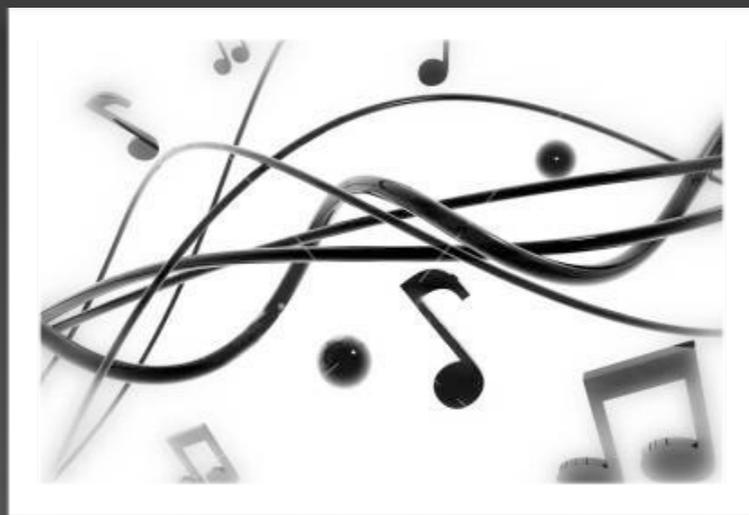
Lavori privati per artisti come *Andrea Bocelli, Eros Ramazzotti, Ligabue, Piero Pelù + Litfiba, Enrico Cremonesi, Mogol, Venditti, Marco Masini, Homo Sapiens, Planet Funk, Renato Zero.*

Progettazione di chiese, teatri, auditoria, sale conferenza, home-theater.

Tra i progetti più importanti si riportano:

- Barys Arena (ice hockey) @ Astana, Kazakhstan;
- Studi FOX post-produzione a/v @ Hammersmith, London (UK);
- Studi FOX post-produzione a/v @ München (DE);
- D:POT Recording Arts @ Prato – Fabrizio Simoncioni;
- Studio Renato Zero @ Roma;
- Damian Lazarus – Monastic Studio @ Vicchio (FI);
- Vinai Studio @ Brescia;
- Mulinetti Studio @ Genova (Resolution Award 2015 — Best Audio Facility, Nomination);
- The Garage @ Civitella v.d.C. (AR) (Resolution Award 2014 — Best Audio Facility, Nomination);
- House of Glass @ Viareggio (LU) (Resolution Award 2013 — Best Audio Facility, Nomination);
- PPG Studios (Andrea Bocelli) @ Santo Pietro Belvedere (PI);
- In House (sala mix cinema Dolby® approved) @ Roma;
- George Lucas Home Theater, Italy;
- Chiesa di Santa Maria Nuova (Arch. Mario Botta) @ Terranuova Bracciolini (AR);
- Prada Auditorium and Conference Room via Orobica @ Milano;
- Sala Proiezioni Museo Ferrari @ Maranello (MO).

1.1 Il Fenomeno Sonoro



Sorgente

1



Mezzo

(zona di trasmissione)

2



Ascoltatore

3

Il Mezzo elastico

Il suono richiede un mezzo elastico in cui propagarsi.

Il suono nell'aria: le particelle di materia coinvolta nel trasporto del suono fluttuano attorno ad una posizione di equilibrio e il loro moto è parallelo alla direzione dell'onda:
onde longitudinali.

In altri mezzi il suono si può propagare sotto forma di onde di tipo trasversale.



Velocità del suono

La velocità del suono è la velocità con cui un suono si propaga in un certo ambiente, detto mezzo.

La velocità del suono varia a seconda del mezzo (ad esempio, il suono si propaga più velocemente nell'acqua che non nell'aria), e varia anche al variare delle proprietà del mezzo, specialmente con la sua temperatura.

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{343}{\lambda}$$



Velocità del suono

Influenza della temperatura dell'aria sulla velocità del suono

T in °C	a in m/s	ρ in kg/m ³	Z in N·s/m ³
-10	325,4	1,341	436,5
-5	328,5	1,316	432,4
0	331,5	1,293	428,3
+5	334,5	1,269	424,5
+10	337,5	1,247	420,7
+15	340,5	1,225	417,0
+20	343,4	1,204	413,5
+25	346,3	1,184	410,0
+30	349,2	1,164	406,6

Materiali	Velocità del suono [m/s]
Aria	343
Acqua	1 480
Ghiaccio	3 200
Vetro	5 300
Acciaio	5 200
Piombo	1 200
Titanio	4 950
PVC (morbido)	80
PVC (duro)	1 700
Calcestruzzo	3 100
Faggio	3 300
Granito	6 200
Peridotite	7 700
Sabbia (asciutta)	10-300



Grandezze fisiche acustiche

Pressione acustica

Pressione efficace:

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}$$

Densità di energia:

$$D = \frac{p_{eff}^2}{\rho \cdot c^2}$$

ρ = densità del mezzo
 c = velocità del suono

Livelli sonori:

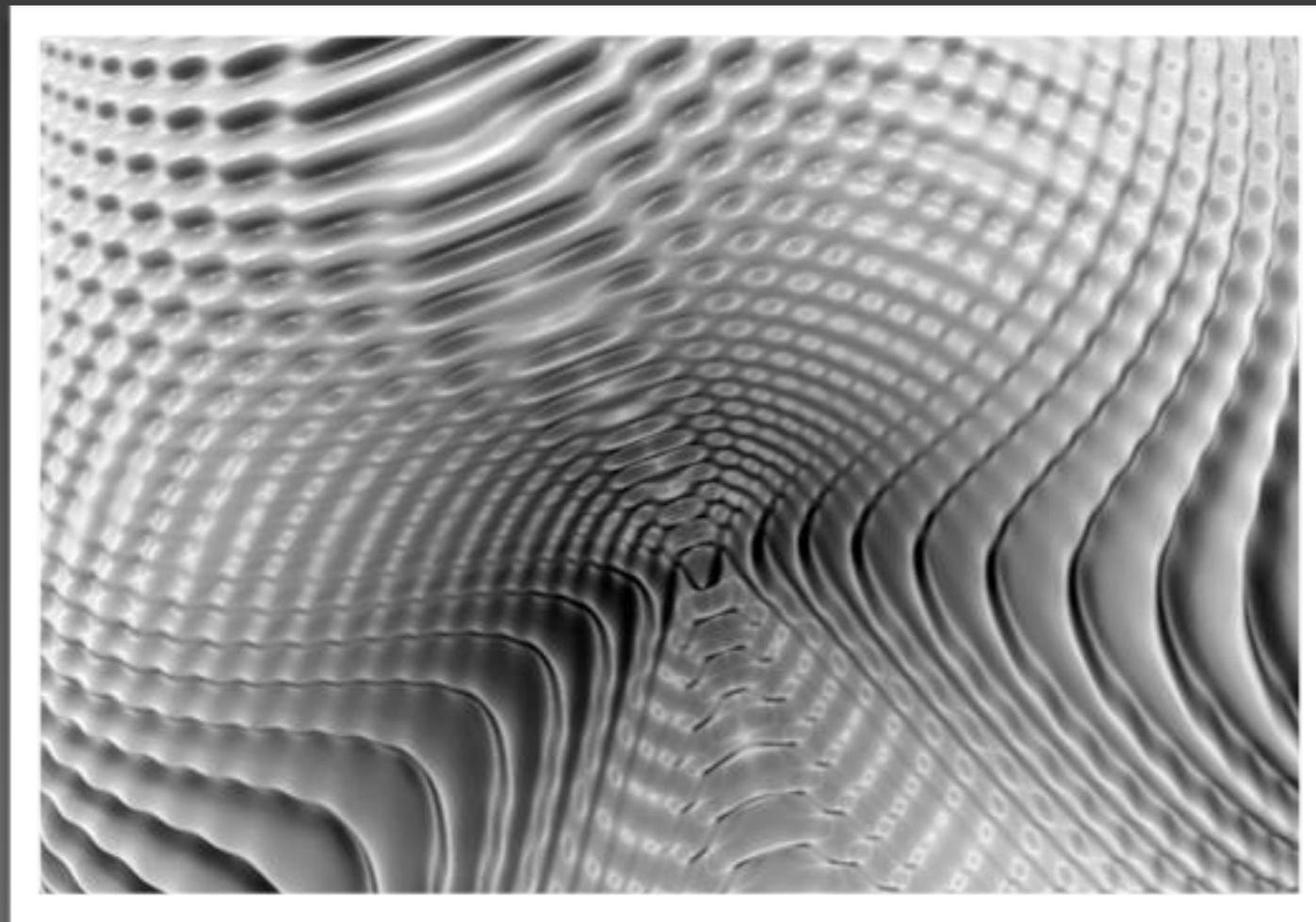
$$L_p = 10 \log \frac{p_{eff}^2}{p_{rif}^2} = 20 \log \frac{p_{eff}}{p_{rif}} \quad \text{dB}$$

$$p_{rif} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$$

$$L_w = 10 \log \frac{w}{w_{rif}}$$

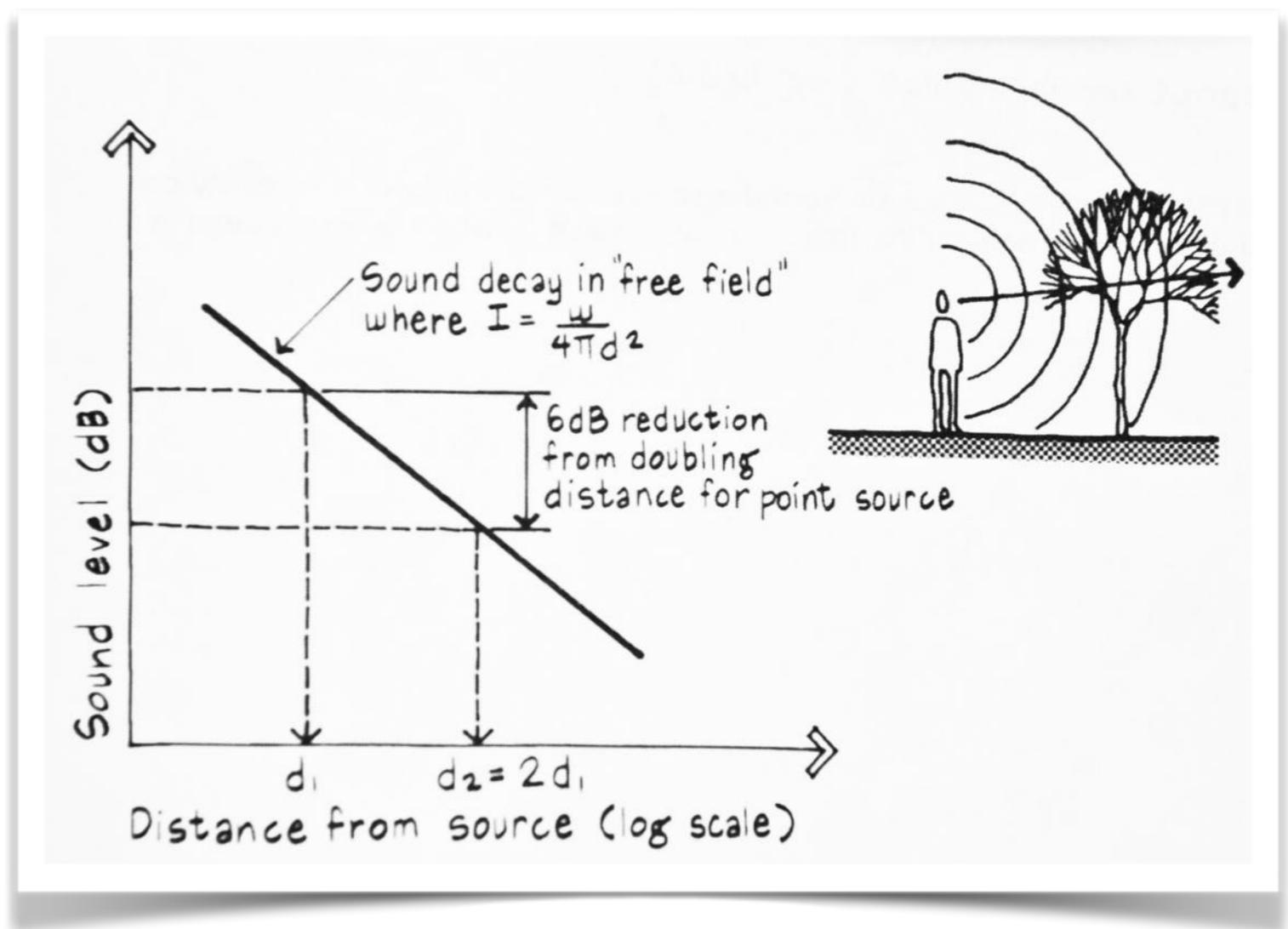
$$w_{rif} = 10^{-12} \text{ W}$$

1.2 Propagazione del suono

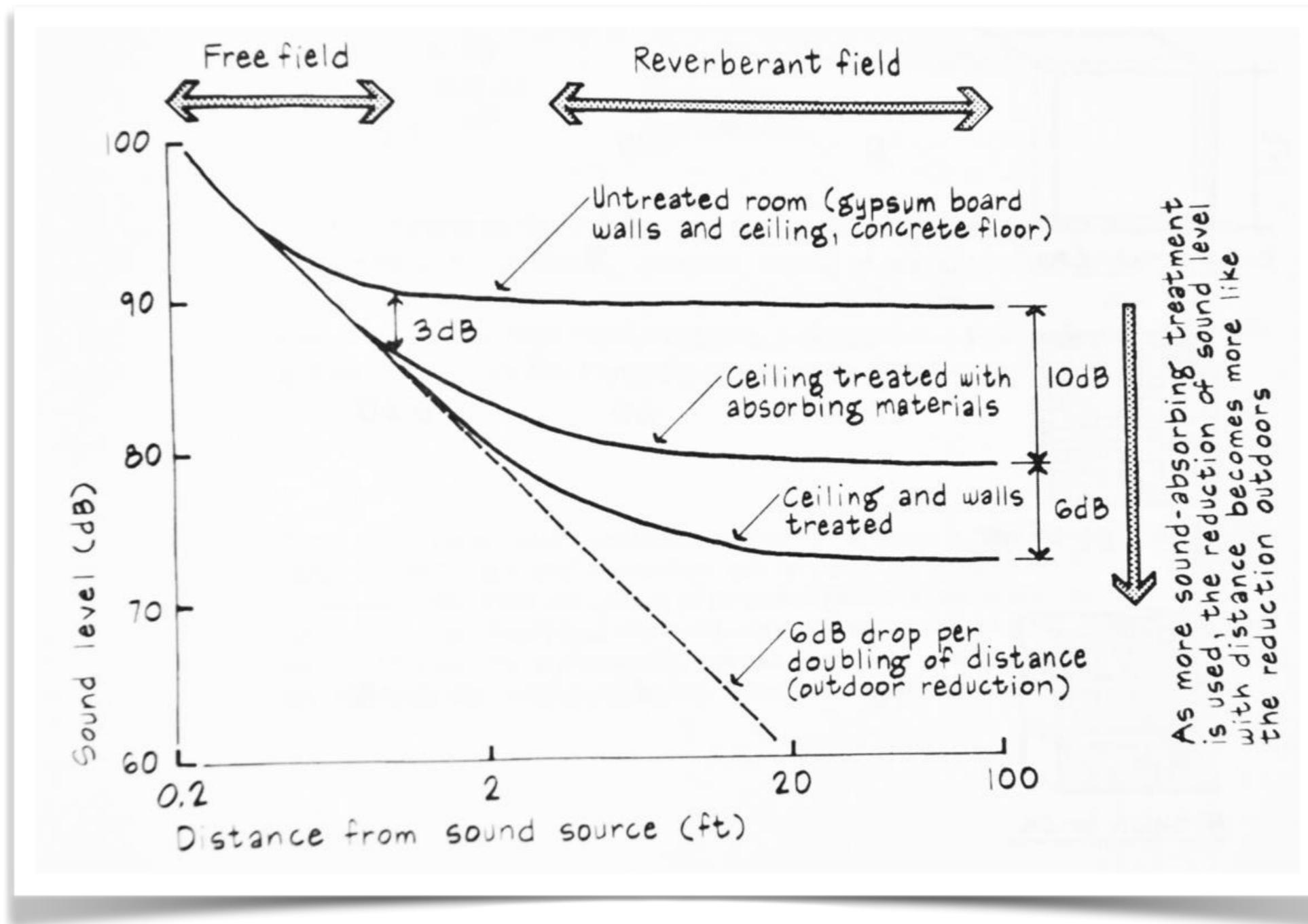


Attenuazione del suono con la distanza in campo libero

In campo libero il suono decade di 6 dB per ogni raddoppio della distanza.



Attenuazione del suono con la distanza in un ambiente chiuso



Il decadimento del suono in un ambiente chiuso dipende dalle proprietà assorbenti, riflettenti e diffondenti delle superfici che lo costituiscono.

(muri, pavimenti pareti, oggetti, persone etc)



Relazioni tra livelli sonori

Ambiente chiuso

Campo riverberante $L_p \cong L_w + 10 \log \frac{4}{A}$

Campo semiriverberante $L_p \cong L_w + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$

dove $R = 10 \log \frac{1}{\tau} = 10 \log \frac{1}{\alpha - \delta} = \frac{\bar{\alpha} \cdot S}{1 - \bar{\alpha}} = \frac{S \cdot A}{S - A}$

e Q è il fattore direttività della sorgente
per sorgenti omnidirezionali è 1

Se l'ambiente chiuso è
riverberante, il livello di
pressione sonora è

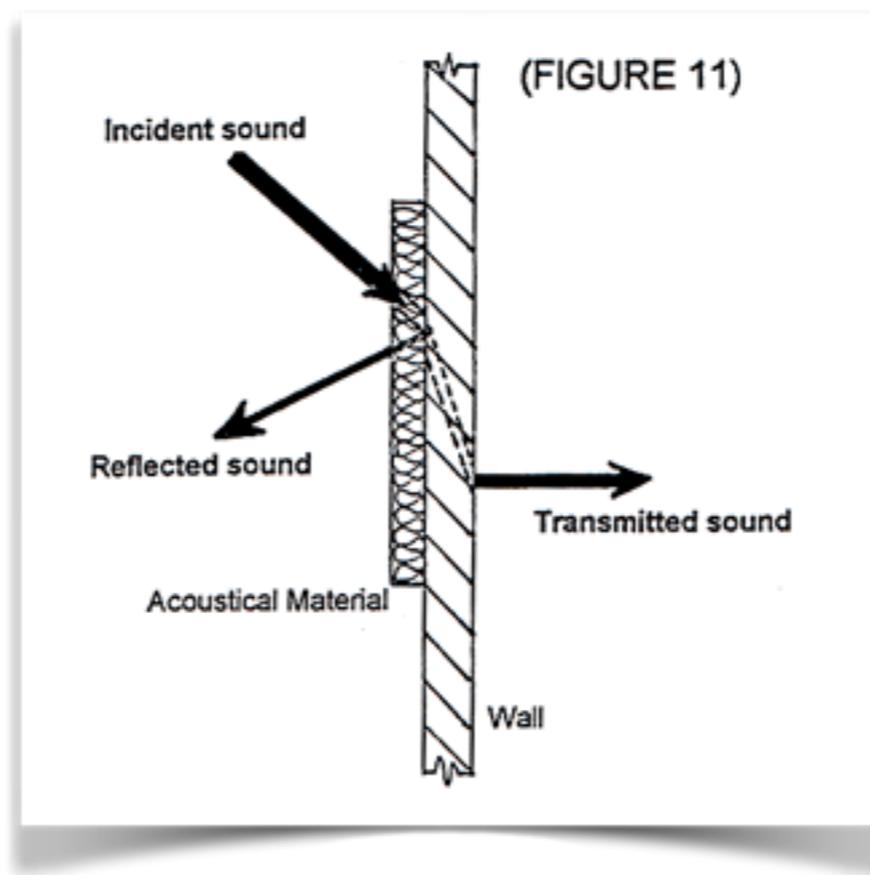
(con buona approssimazione)

lo stesso in tutti i punti.

(L_p non dipende da r)



1.3 Proprietà dei Materiali: assorbimento, riflessione e diffusione



Acoustical treatment

Temporal response

Spatial response

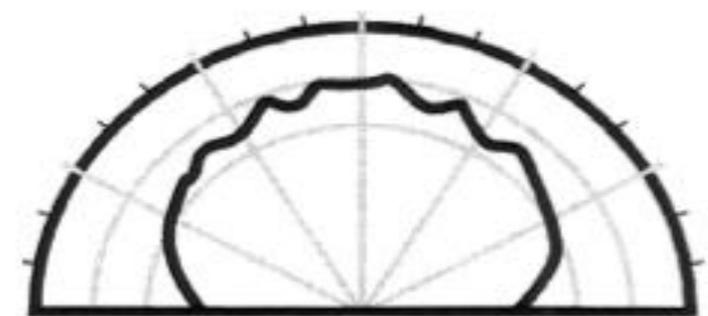
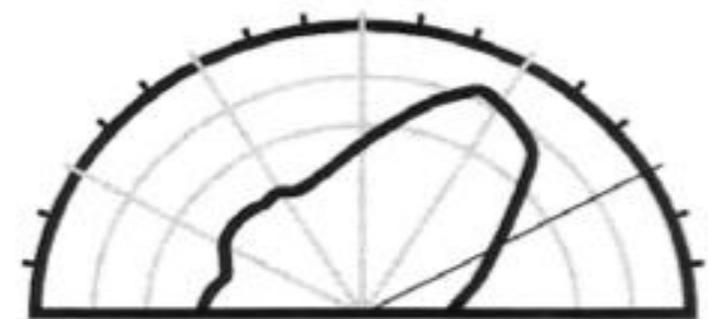
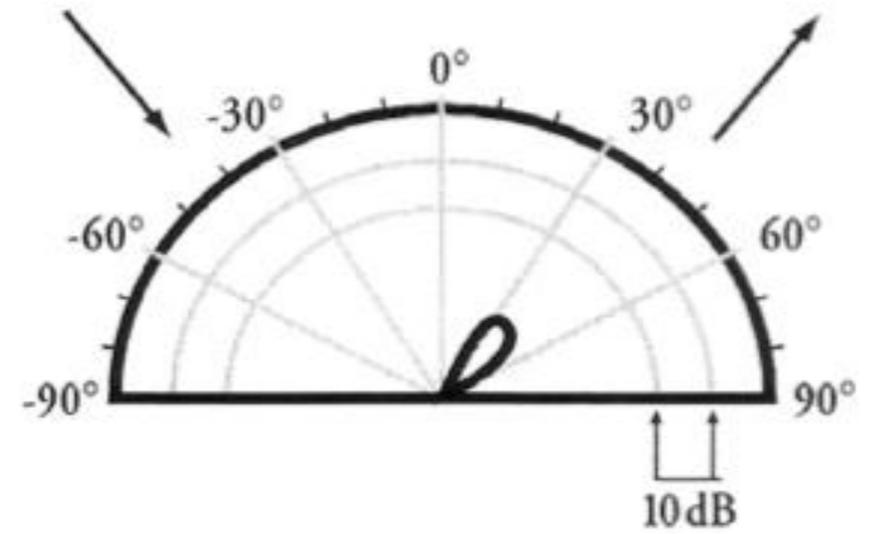
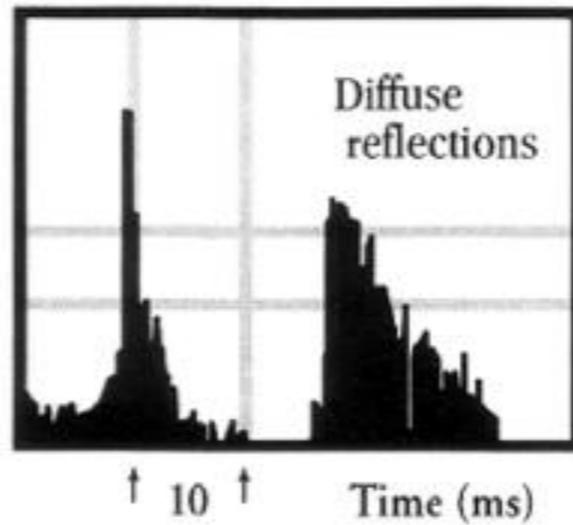
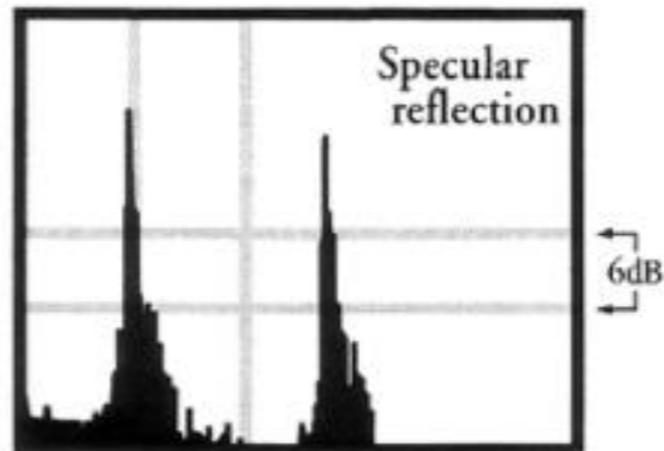
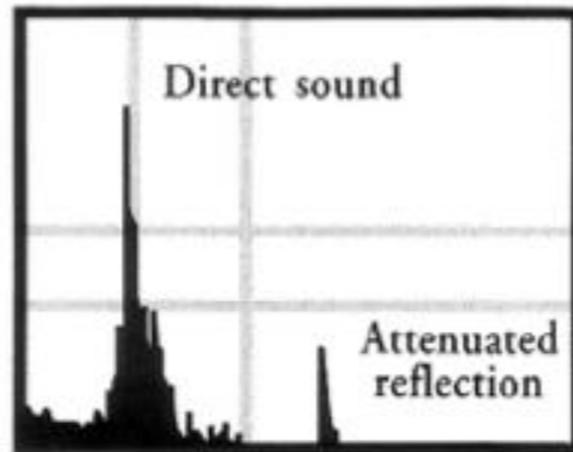
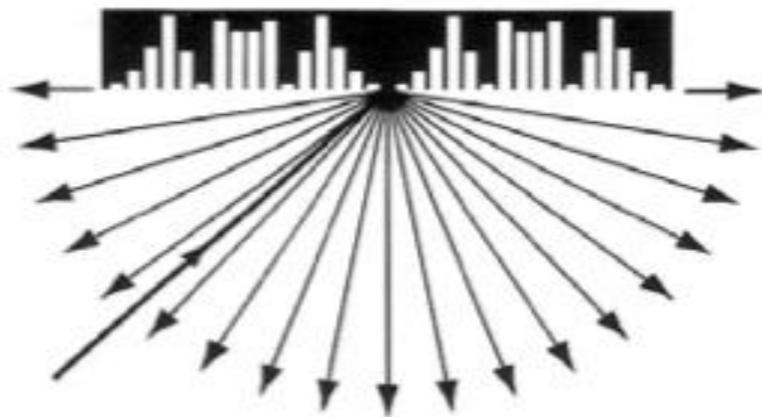
Absorption



Reflection



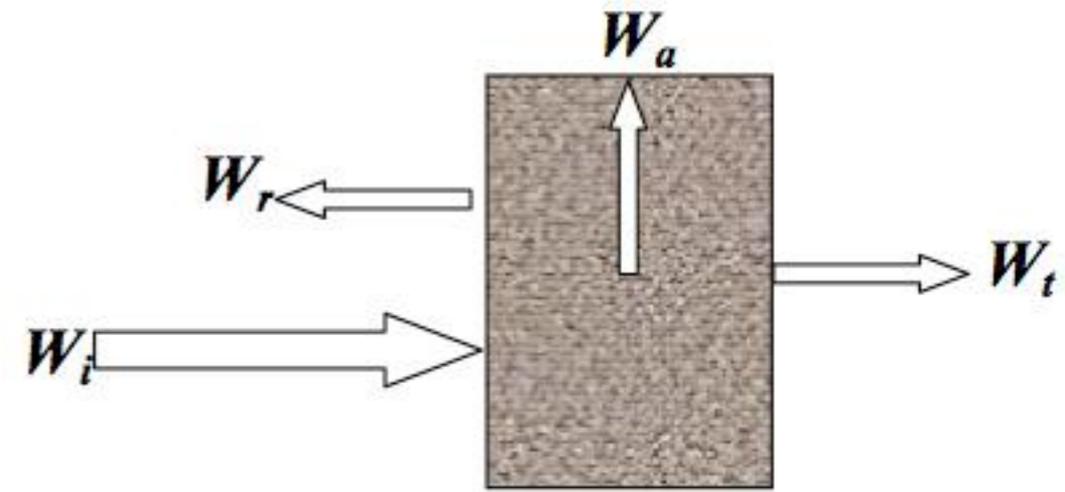
Diffusion



**Le proprietà di
assorbimento, riflessione e
diffusione acustica
influiscono sulle
caratteristiche
temporali e spaziali
dell'ambiente.**



In un ambiente chiuso la porzione di energia riflessa dalle superfici di confine dipende dal loro comportamento acustico, in generale descritto dai coefficienti di riflessione, assorbimento e trasmissione:



Bilancio energetico per il teorema della conservazione dell'energia:

$$W_i = W_r + W_a + W_t$$

Definisco i coefficienti come rapporti tra energie:

$$r = \frac{W_r}{W_i} \quad \delta = \frac{W_a}{W_i} \quad \tau = \frac{W_t}{W_i}$$

Relazione tra i coefficienti: $r + \delta + \tau = 1$

Definizione di coefficiente di assorbimento acustico apparente:

$$\alpha = 1 - \frac{W_a + W_t}{W_i} = 1 - r$$

Assorbimento acustico

Assorbimento
acustico di una
superficie:

$$A = S \cdot \alpha \quad [\text{m}^2]$$

Assorbimento acustico totale
di una stanza con n superfici:

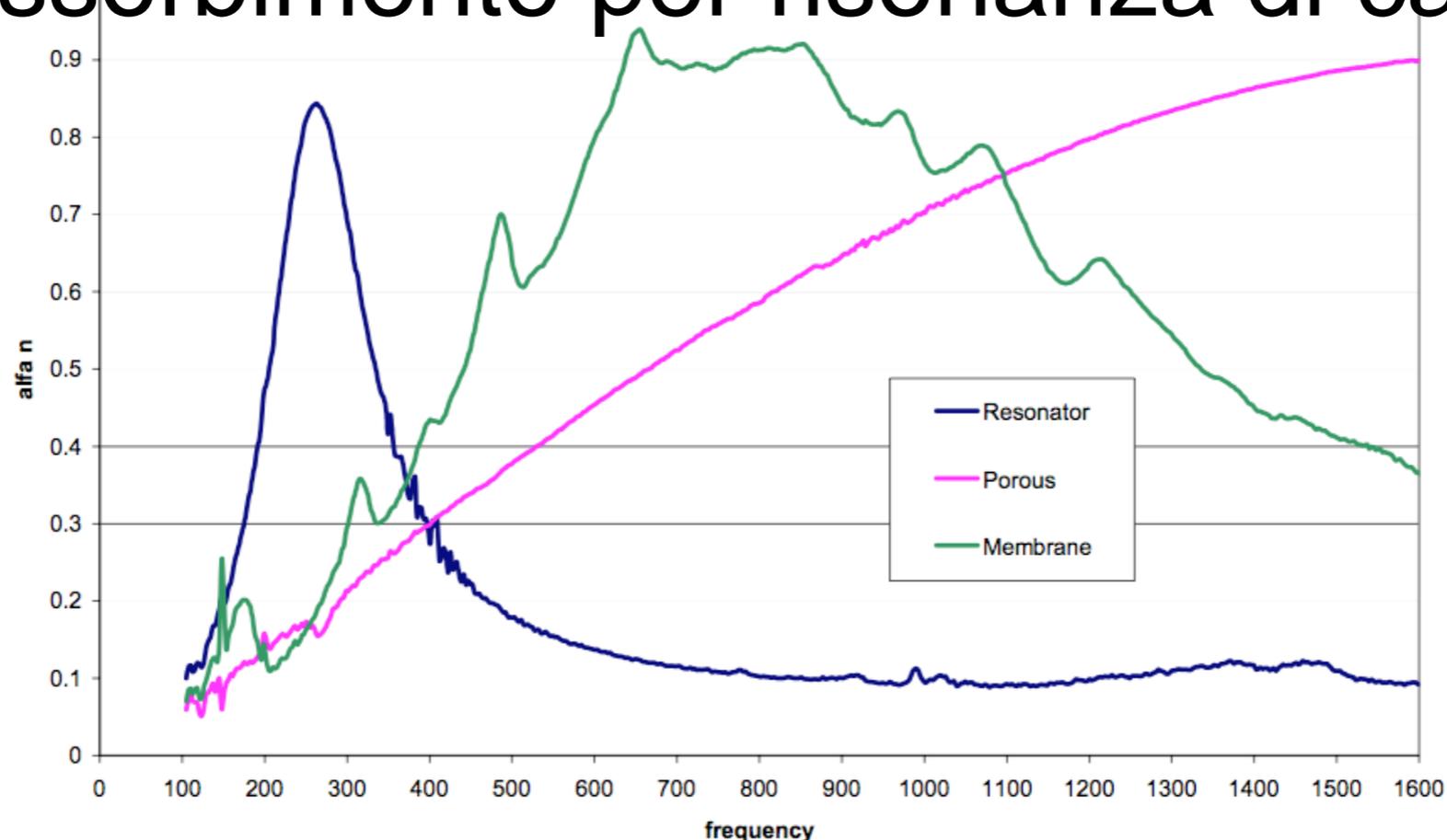
$$A = S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + \dots + S_n\alpha_n = \Sigma S_i\alpha_i \quad [\text{m}^2]$$

Assorbimento acustico

1. Assorbimento per porosità

2. Assorbimento per risonanza di membrana

3. Assorbimento per risonanza di cavità



1. Materiali assorbenti per porosità

Assorbono l'energia sonora per un fenomeno di tipo dissipativo legato all'attrito viscoso che si genera tra struttura del materiale

e particelle d'aria in moto

materiali fibrosi (lana di vetro, lana di roccia, fibra di poliestere, feltri fibre di acido polilattico (mais), fibre vegetali (cotone, canapa, cocco, legno, cellulosa etc), fibre animali (lana, piuma d'oca etc))

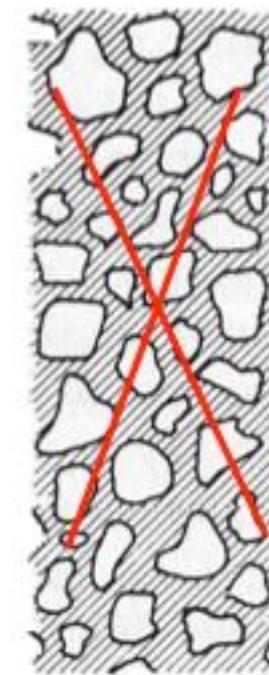
materiali porosi (o a celle aperte) (poliuretani espansi a cella aperta, resina melamminica, schiuma espansa a base di polietilene, schiume di alluminio, aggregati di elastomeri espansi, altri materiali aggregati tipo pietra, gomma plastica etc)

NON SONO FONOASSORBENTI!!!

Attenzione perché sul mercato ci sono molti materiali che vengono venduti con esoteriche proprietà fonoassorbenti, quindi è facile sbagliare, in particolare diffidate dai materiali che non hanno almeno uno dei seguenti requisiti:

- contengono un'elevata percentuale di aria al loro interno, in collegamento con l'ambiente esterno
- consentono al campo acustico di penetrare al loro interno e di dissipare energia per attrito viscoso sulle pareti della struttura del materiale

SI

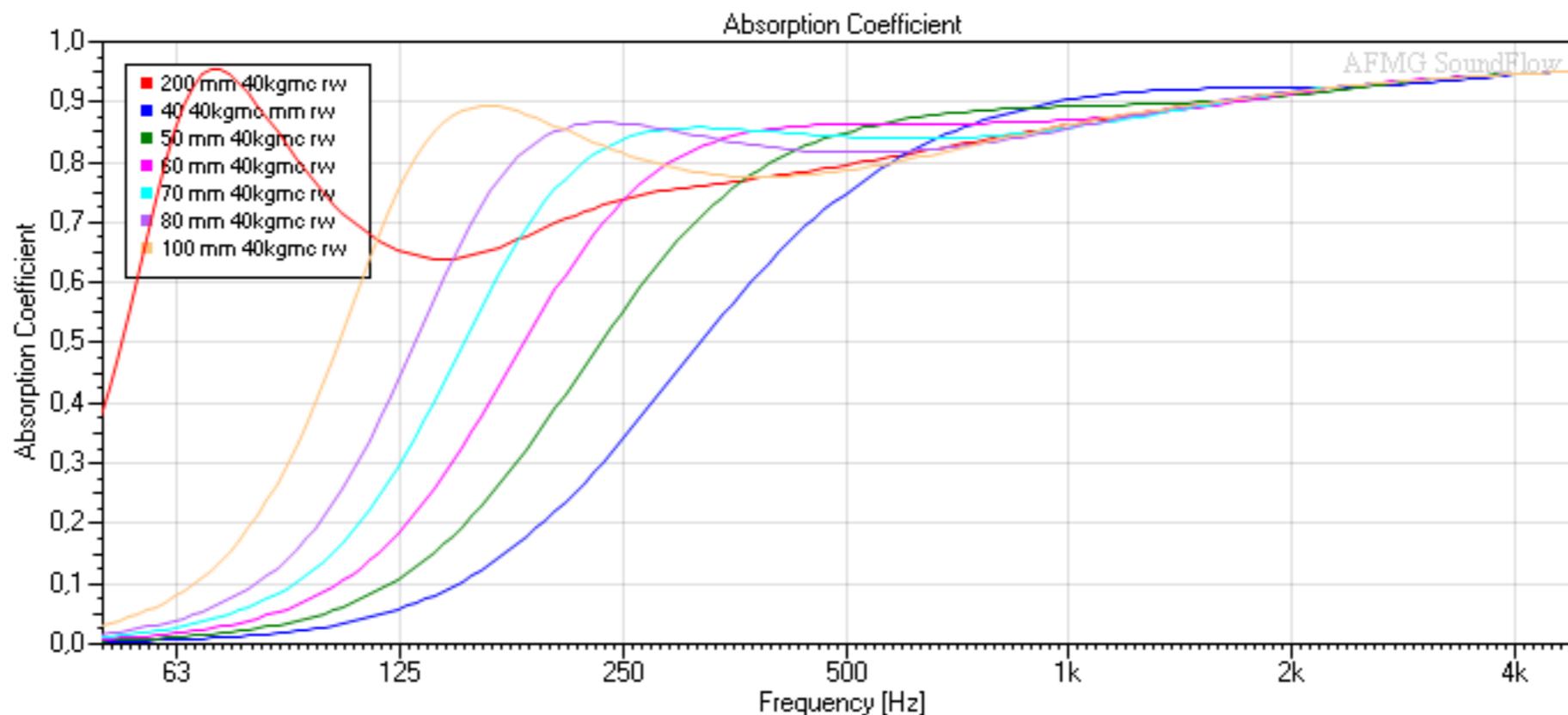


NO

Esempio:
Polietilene,
poliuretani a cella
chiusa, polistirolo

Effetto dello spessore nell'assorbimento

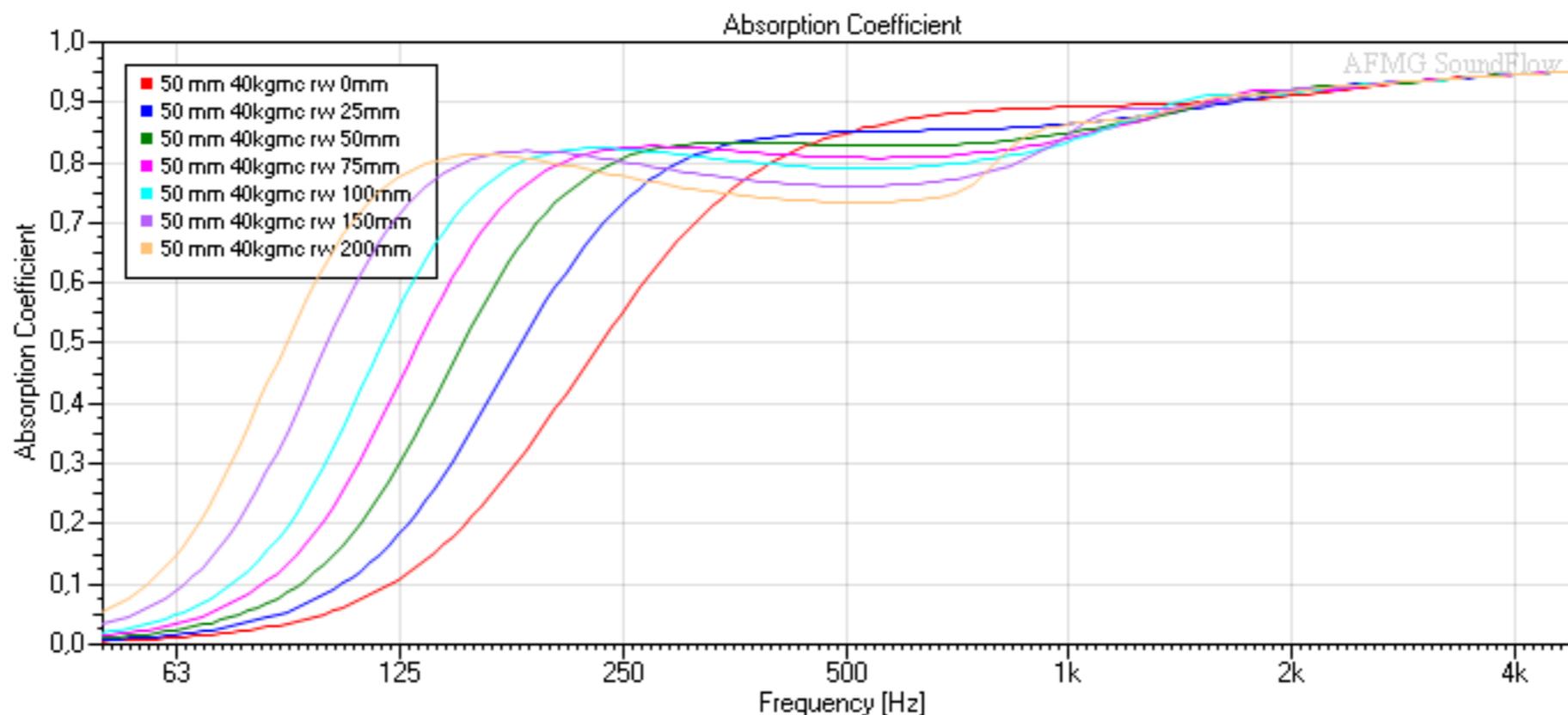
Lo spessore del materiale fonoassorbente aumenta le prestazioni di fonoassorbenza in particolar modo alle basse frequenze



Attenzione perchè 5 cm di lana di roccia non assorbono praticamente niente sotto i 100 HZ!!!

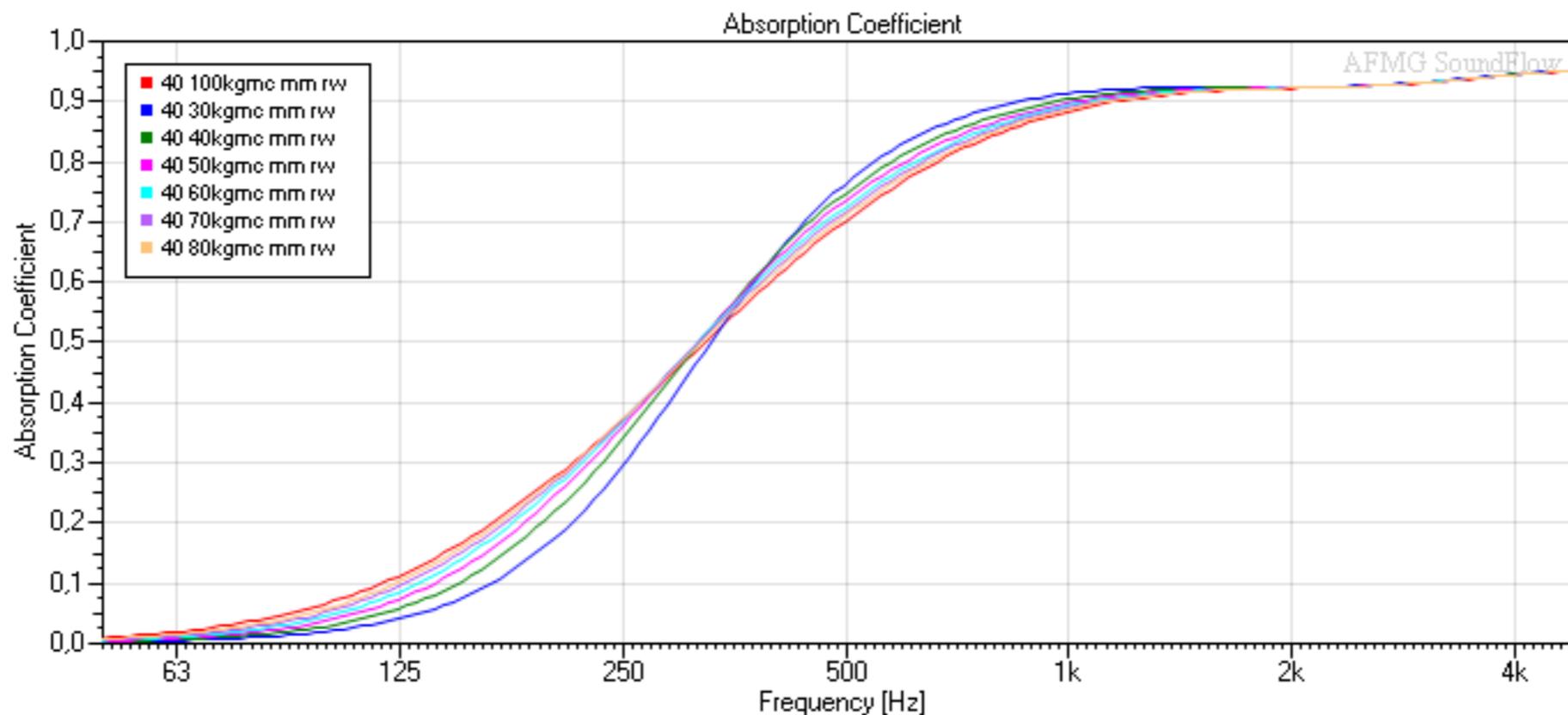
Effetto della camera d'aria nell'assorbimento

Anche la camera d'aria posta tra il materiale e la superficie rigida aumenta le prestazioni di fonoassorbimento in particolar modo alle basse frequenze (un po' meno che lo spessore).

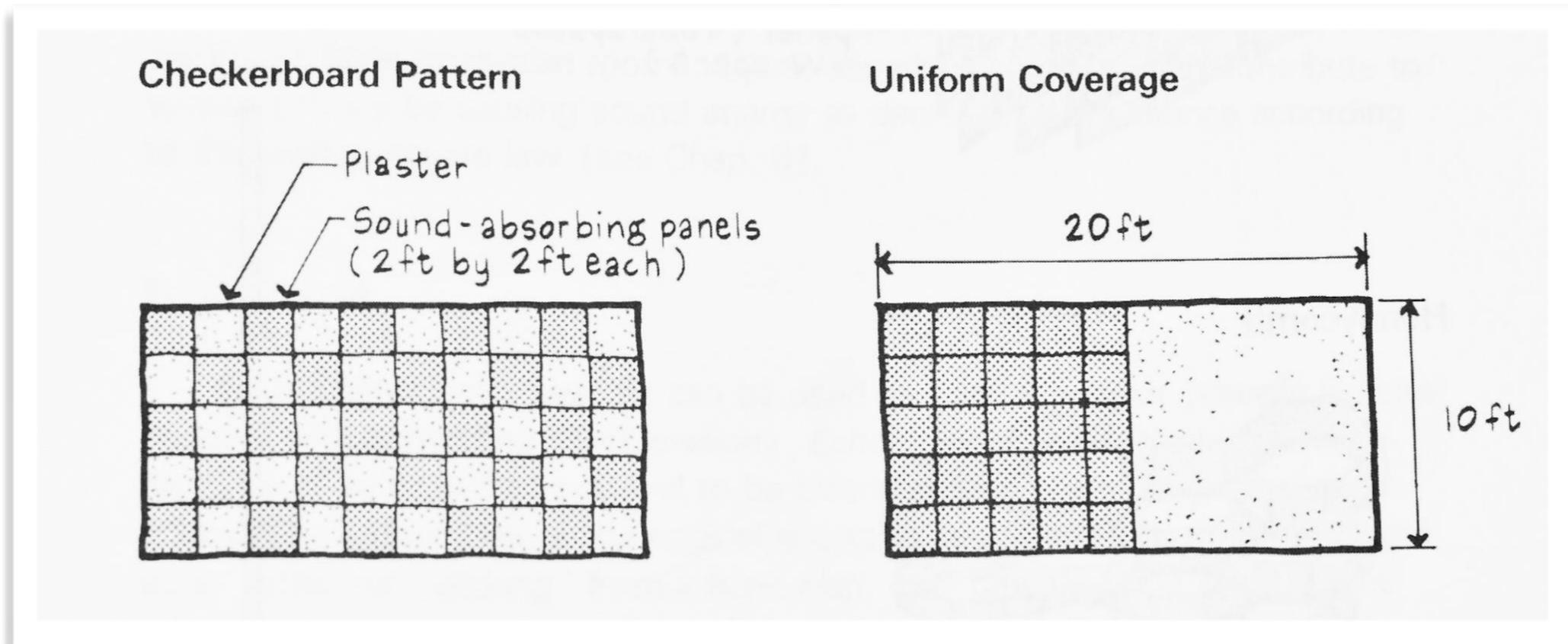


Effetto della densità nell'assorbimento

La densità influisce poco nell'assorbimento: conviene (economicamente) molto di più utilizzare materiali leggeri (max 40 kg/m³) magari più spessi o montati su camera d'aria.



“Area Effect”

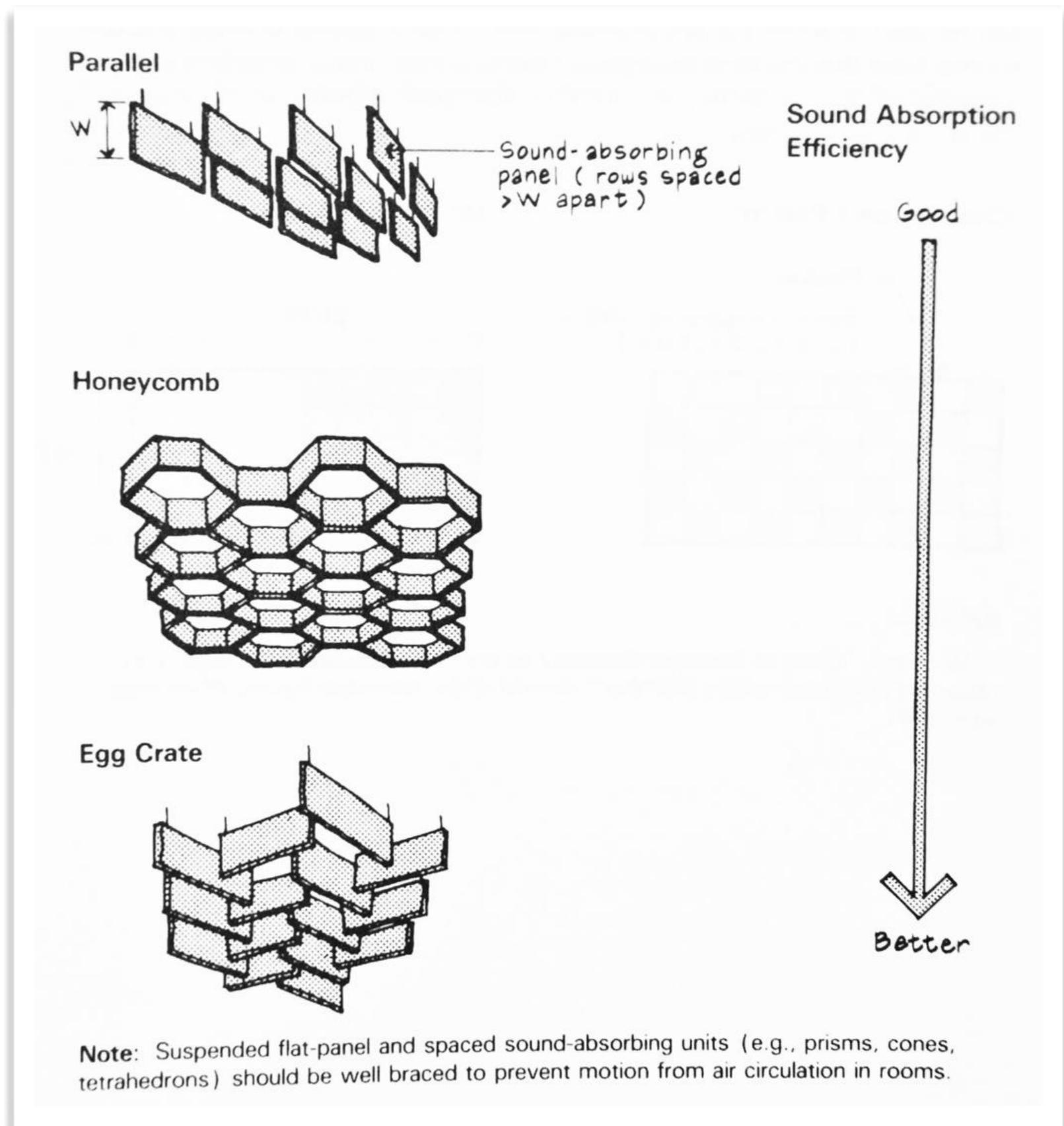
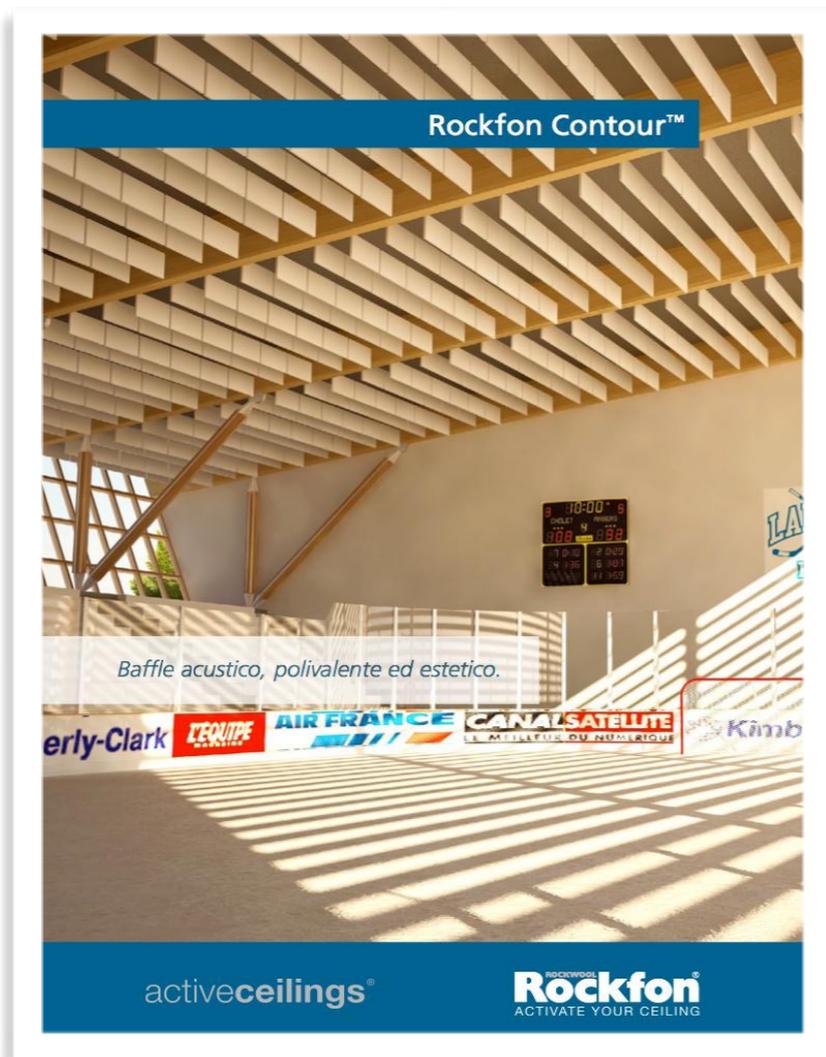


L'efficienza di un materiale fonoassorbente può variare in base alla distribuzione e posizionamento in una stanza. Per esempio 25 pannelli assorbenti assorbiranno più energia sonora se posizionati a scacchiera piuttosto che in modo uniforme.

Questa variazione è dovuta alla diffrazione dell'energia sonora attorno ai perimetri dei pannelli spaziatati tra loro e all'assorbimento aggiuntivo dei loro bordi.

L'“Area Effect” influisce anche in 3 dimensioni: un caso pratico è l'installazione dei baffles a soffitto.

Alcuni pattern sono meglio di altri.



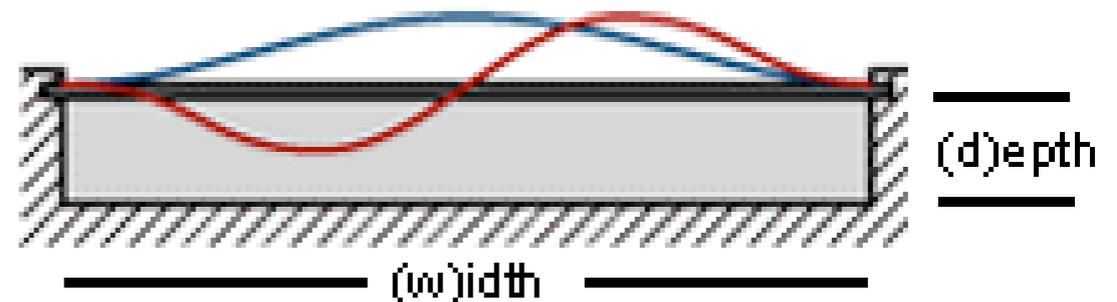
2. Assorbitori a membrana

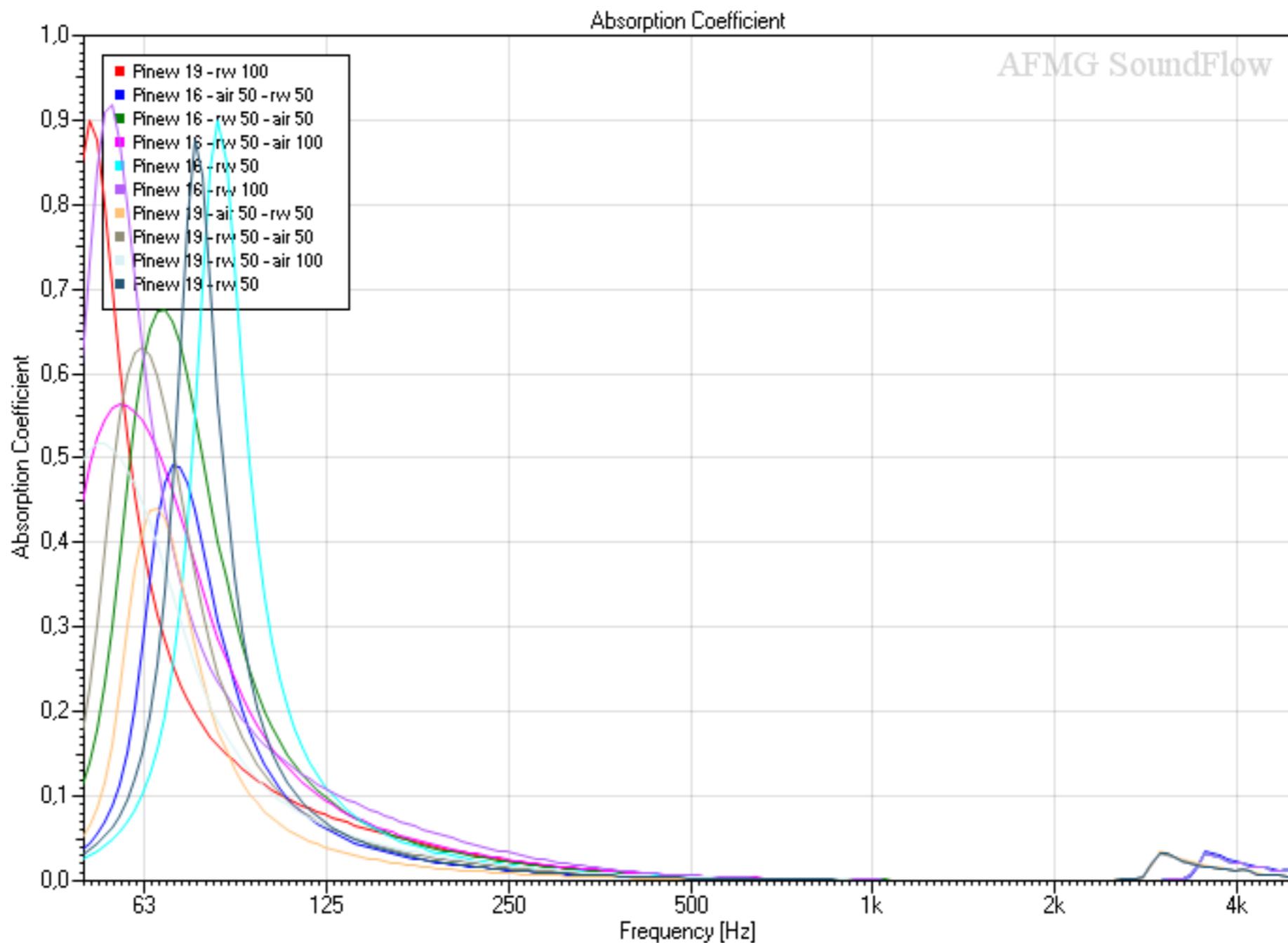
Assorbono l'energia sonora per un fenomeno di tipo dissipativo legato allo smorzamento dell'oscillazione che si genera alla risonanza della massa d'aria parzialmente confinata o di una superficie vibrante sollecitata da onde sonore incidenti su di essa.

$$f_0 = \frac{62}{\sqrt{\rho_A \cdot d}}$$

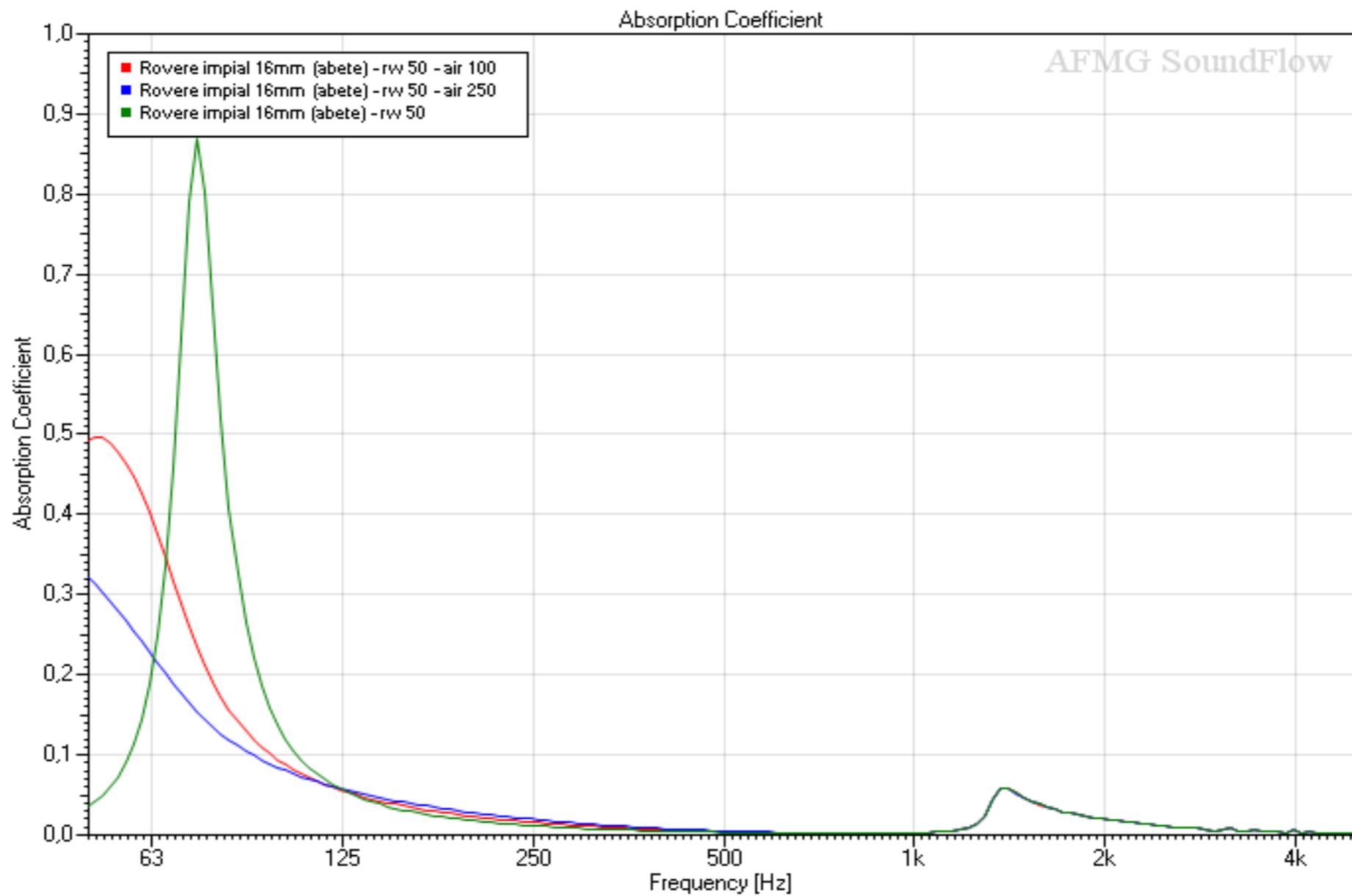
ρ_A = densità del pannello (kg/m²)

d = spessore della camera d'aria (cm)





Pannelli risonanti: nella legenda il primo numero indica lo spessore in mm del pannello, la sigla rw indica la lana di roccia e il suo spessore e la sigla air indica la camera d'aria e il suo spessore.



Tre diversi pannelli risonanti in rovere impiallacciato su abete: nella legenda il primo numero indica lo spessore in mm del pannello, la sigla rw indica la lana di roccia e il suo spessore e la sigla air indica la camera d'aria e il suo spessore.

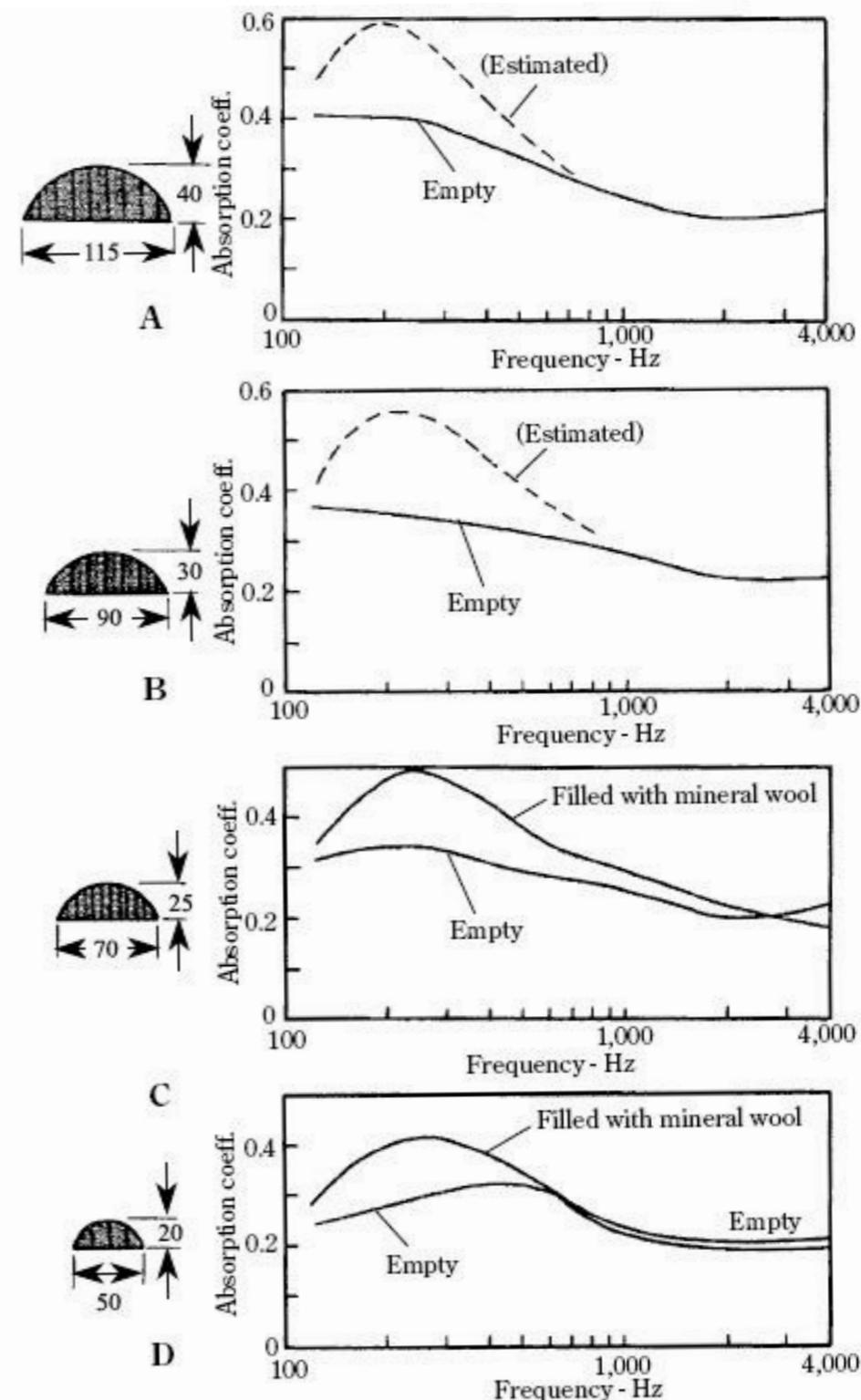
Assorbitori policilindrici

sono diffusori (ad alte freq.)
e assorbitori (alle medio-

basse)

Il policilindrico inoltre irradia il
suono con un angolo di circa
120° contro i 20° di un pannello
piatto

Se il poly viene riempito
con materiale assorbente
aumenterà il suo potere
assorbente per le basse
frequenze, vedi fig a lato.



Assorbitori per Risonanza

Risonatori di Helmholtz

Assorbitori a pannelli forati

Assorbitori a stecche

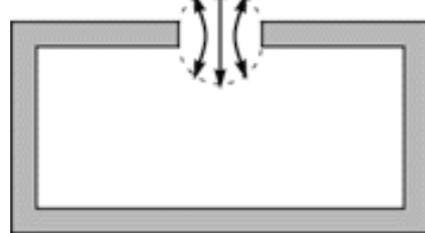
Il principio della risonanza di Helmholtz

Il sistema si basa su una massa che vibra in risonanza con una molla.

Il rapporto tra la massa e la rigidità dinamica della molla definisce la frequenza di risonanza.

In questo caso l'aria agisce come una molla con una rigidità dinamica definita dal suo volume: più grande è il volume e più diventa debole la molla (frequenza di risonanza più bassa).

Per un risonatore di Helmholtz la massa è rappresentata dalla massa d'aria racchiusa nel collo del risonatore.



$$f_H = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V \cdot l}}$$

A = area del collo

V = volume del risonatore

l = lunghezza del collo

Caratteristiche della risonanza

1. Assorbimento del suono per una data frequenza e con una precisa campanatura. La larghezza della campana dipende dall'attrito del sistema, ad esempio questa si allarga se si inserisce materiale poroso fonoassorbente nel collo dell'apertura o dentro il risonatore stesso.
2. Il suono che non può essere assorbito dal risonatore viene diffuso. In particolare un risonatore irradia il suono dalla sua apertura in modo semisferico.

Assorbitori a pannelli perforati

Possiamo vedere questa struttura come un sistema di risonatori accoppiati.

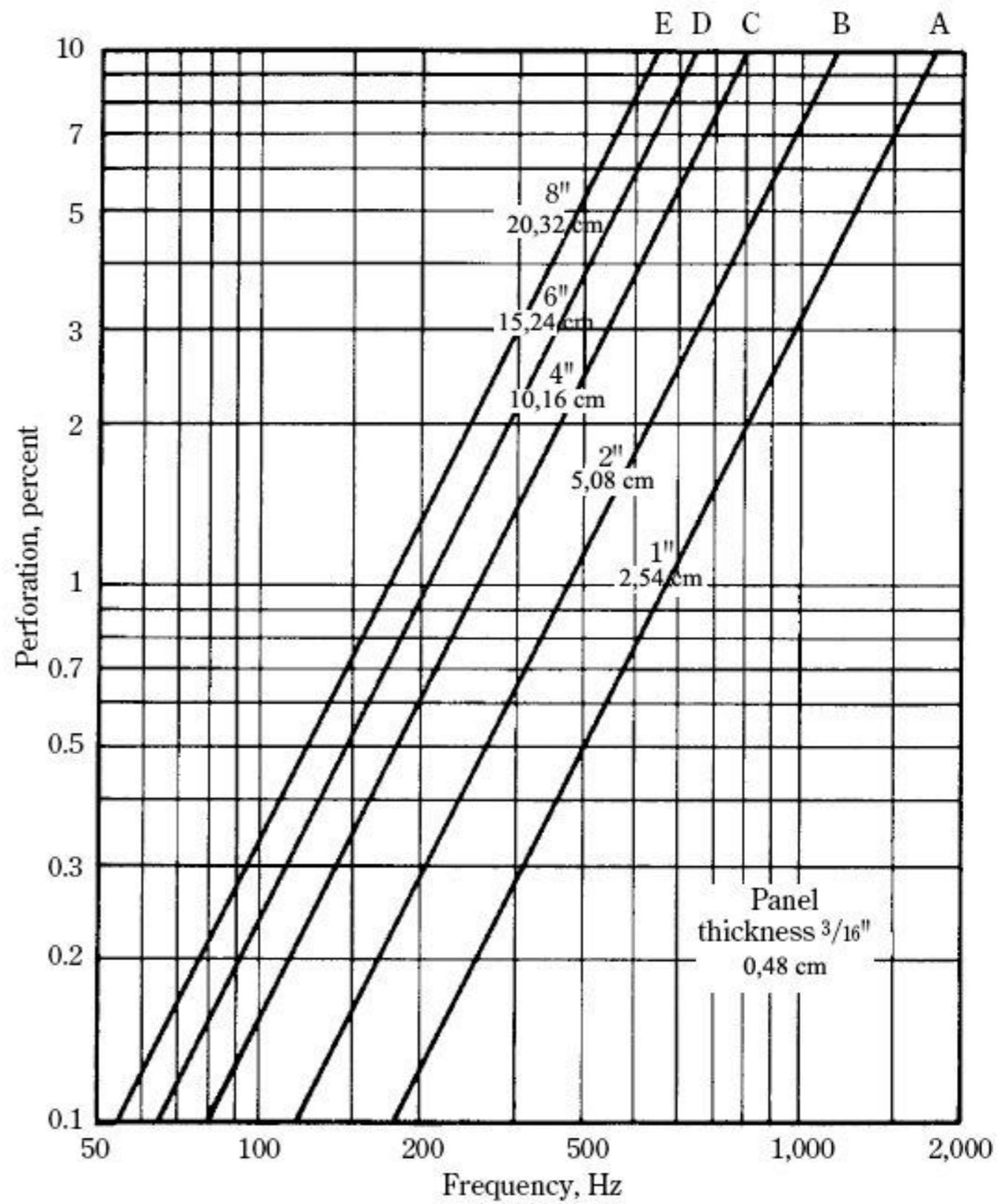
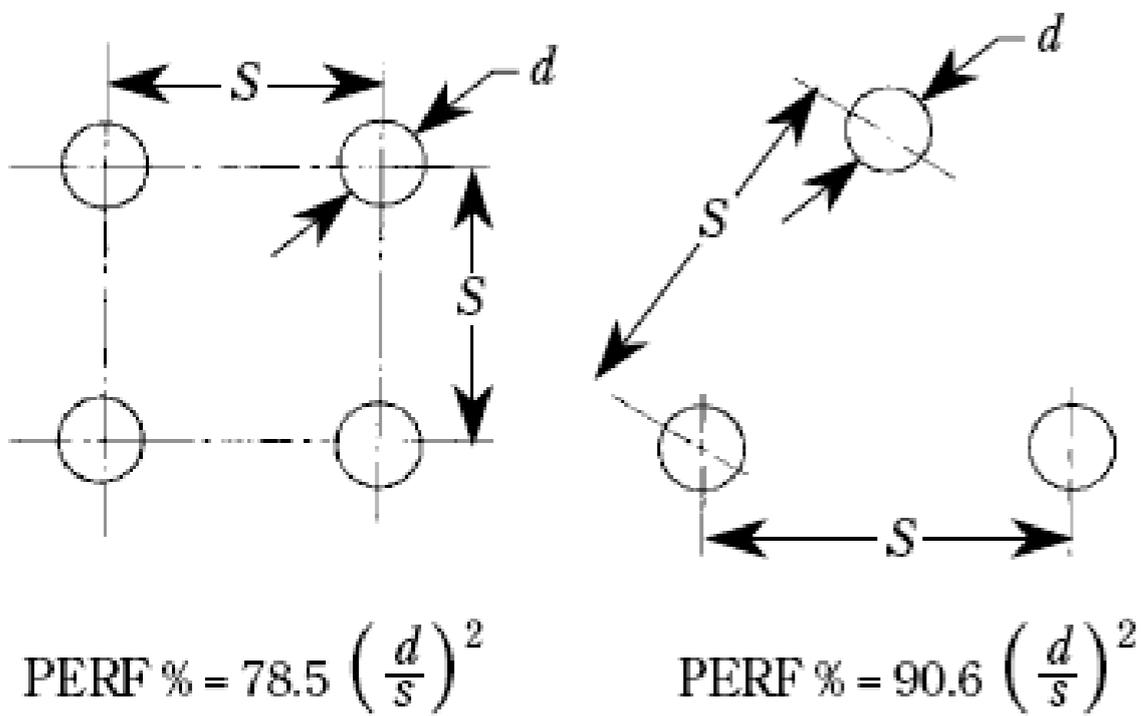
Se il suono giunge perpendicolare al pannello perforato, tutti i piccoli risonatori sono in fase. Per le onde sonore che arrivano dal lato, l'assorbimento è meno efficiente. Questa perdita può essere minimizzata sezionando la cavità dietro alla faccia perforata.

$$f_{Hp} = 508 \sqrt{\frac{P\%}{t \cdot l}}$$

$P\%$ = percentuale di perforazione: (area dei buchi / area del pannello) x 100

t [cm] = lunghezza effettiva dei buchi, con fattore di correzione applicato (spessore pannello + 0.8 x diametro buco)

l [cm] = profondità della camera d'aria



Assorbitori a Stecche

La massa dell'aria negli slot tra tra le stecche reagisce con l'aria nella cavità per formare un sistema risonante.

Si introduce solitamente fibra di vetro dietro agli slot per fare resistenza e allargare quindi il picco d'assorbimento

Più sono stretti gli slot e più sono profonde le cavità, più è bassa la frequenza di assorbimento massimo.

$$f_{Hs} = 5469 \sqrt{\frac{r}{1.2[dD(r+w)]}}$$

r = slot width [cm]

d = slat thickness [cm]

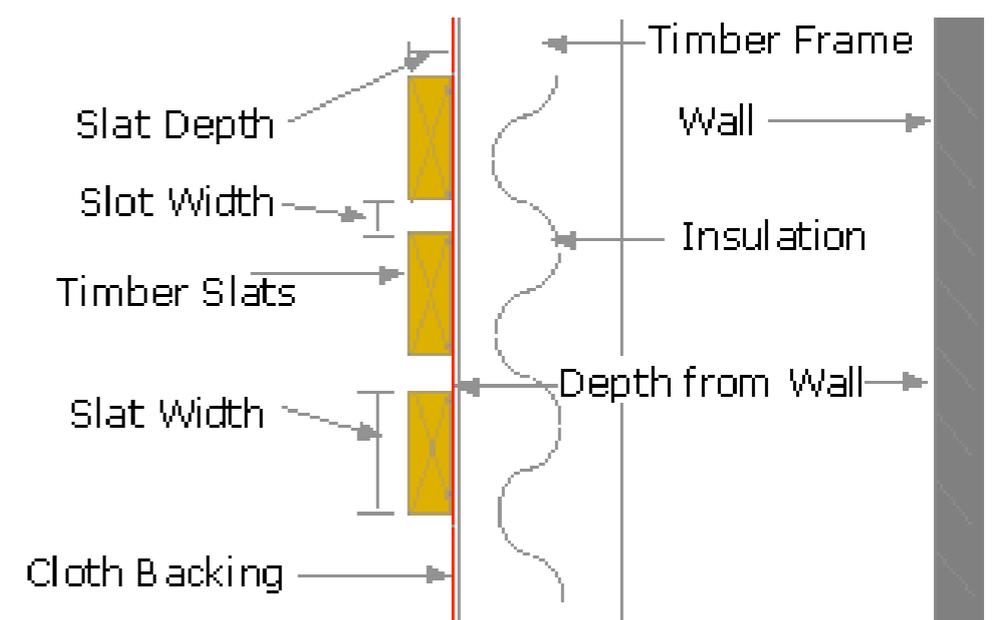
1.2 = mouth correction [cm]

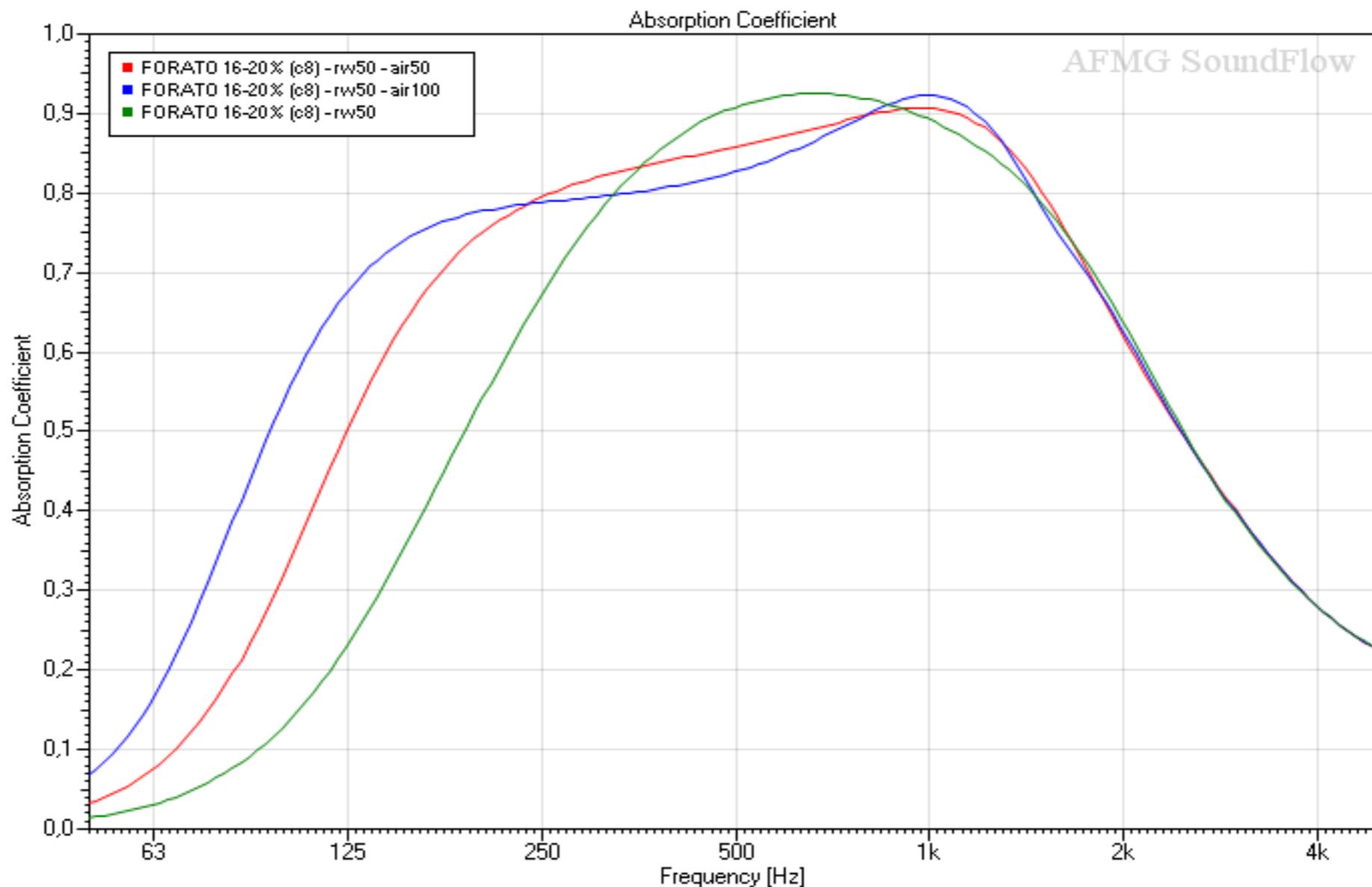
D = cavity depth [cm]

w = slat width [cm]

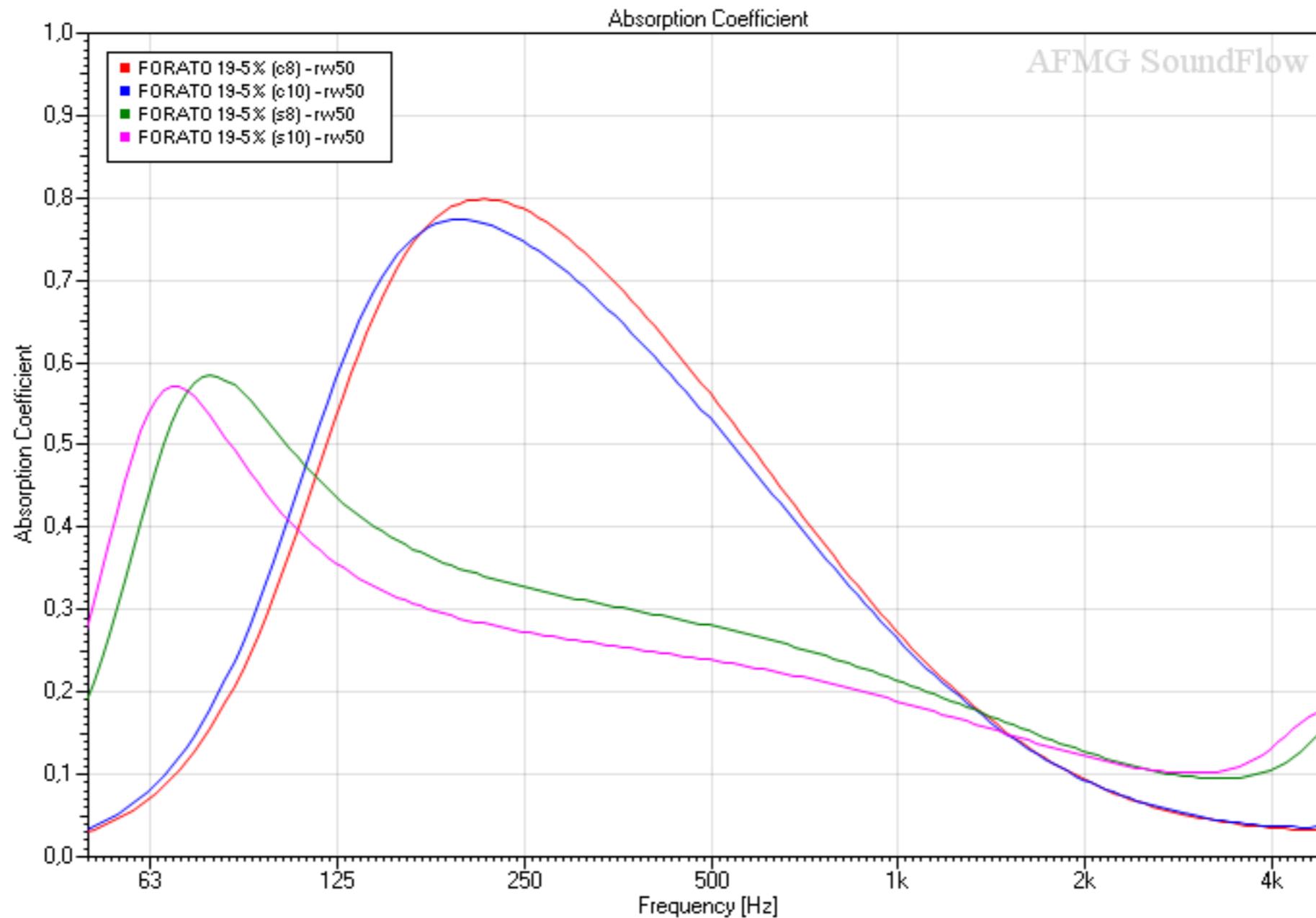
5469 = $c/(2*\pi)$

c = speed of sound [cm/sec] (circa 34300)

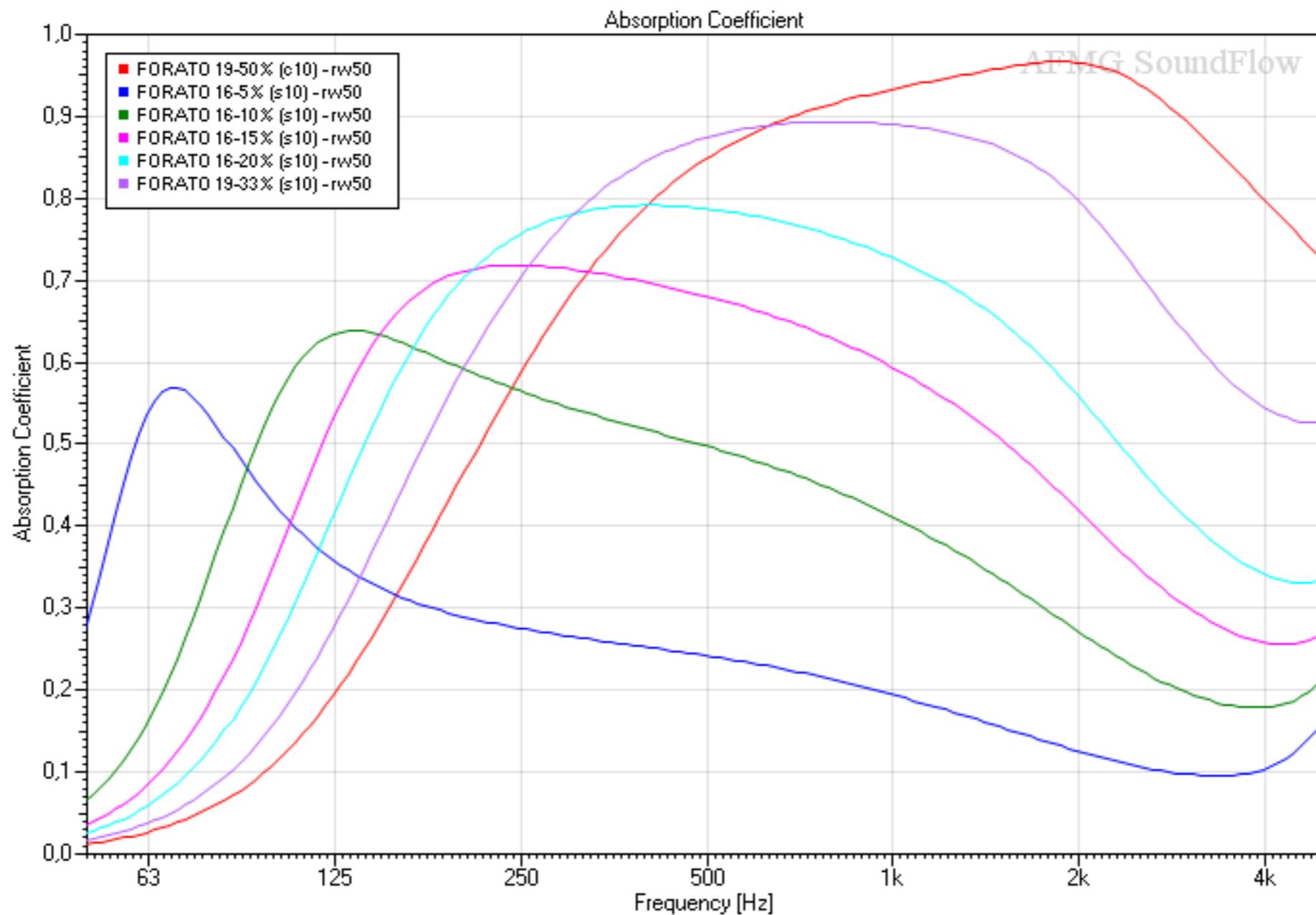




Tre diversi pannelli forati risonanti di stesso spessore (16 mm) e % e tipo di foratura (20% a stecche), montaggio diverso: la sigla rw indica la lana di roccia e il suo spessore e la sigla air indica la camera d'aria e il suo spessore.



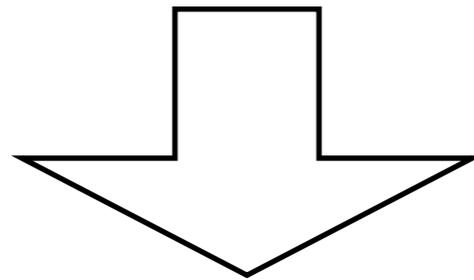
Pannelli forati risonanti (stesso spessore e percentuale foratura, ma di tipo diverso: c = circolare, s = a stecche): nella legenda il primo numero indica lo spessore in mm del pannello, poi c'è la percentuale di foratura (5%), la sigla rw indica la lana di roccia e il suo spessore (50 mm).



Pannelli forati risonanti [stesso montaggio e materiale fonoassorbente (lana di roccia 50 mm), cambia la percentuale di foratura, il tipo (c = circolare, s = a stecche) e lo spessore del pannello]: nella legenda il primo numero indica lo spessore in mm del pannello, poi c'è la percentuale di foratura e il tipo di foratura.

Onde Acustiche

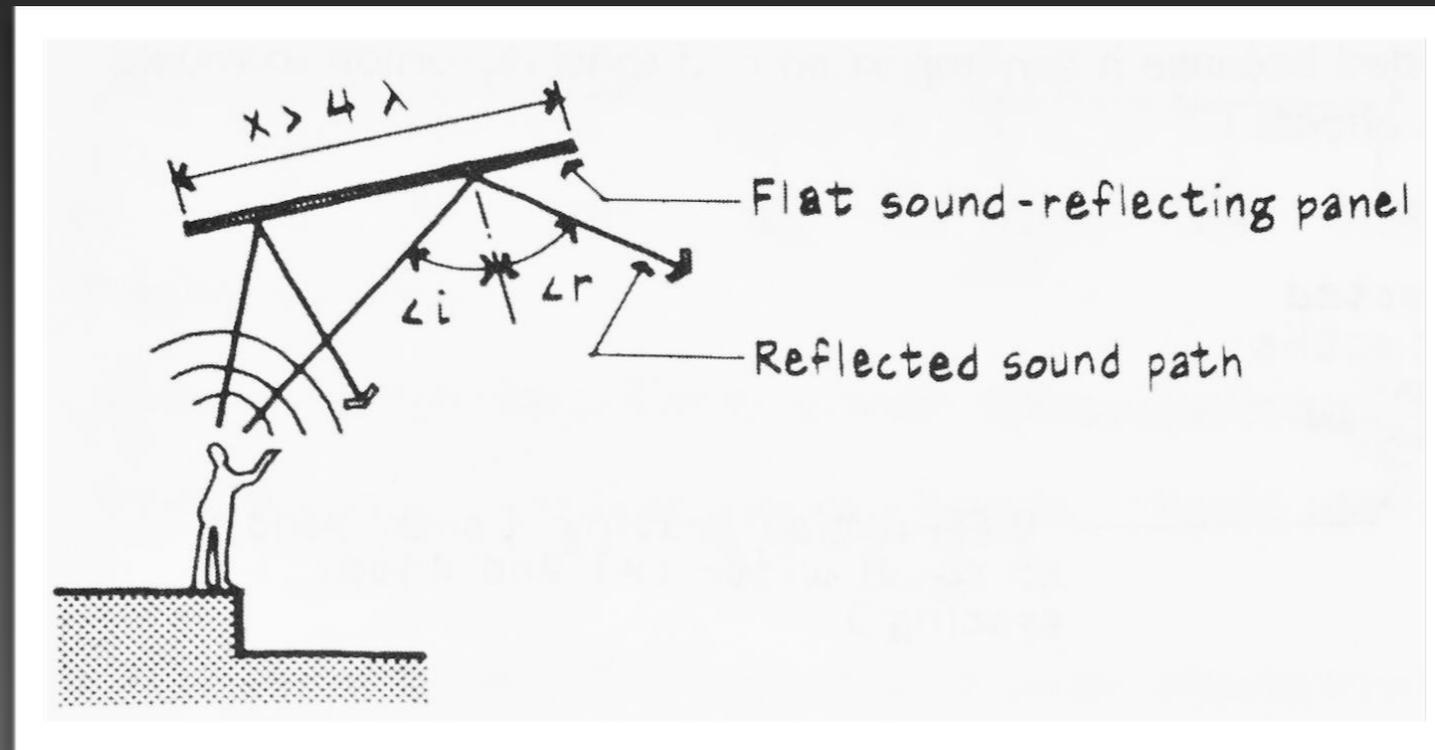
Il suono è un fenomeno di tipo ondulatorio



è soggetto ai tipici comportamenti ondulatori:

Riflessione
Rifrazione
Diffrazione
Interferenza

Riflessione acustica

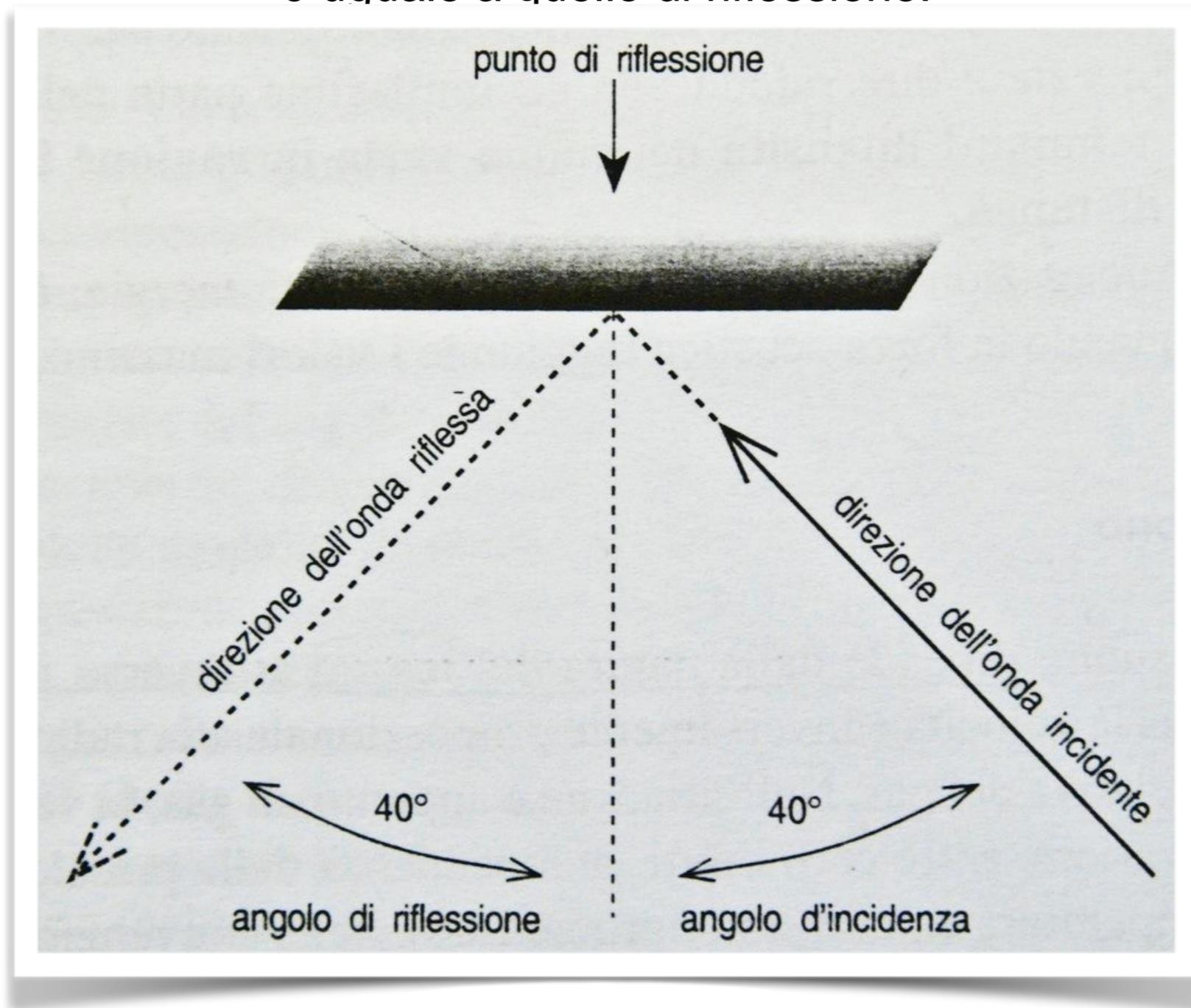


Se la dimensione della superficie x è circa 2÷4 volte la lunghezza d'onda incidente λ , allora l'angolo di incidenza i è uguale all'angolo di riflessione r .

Ad esempio, essendo 0,343 m la lunghezza d'onda di un'onda acustica di 1000 Hz, una superficie di

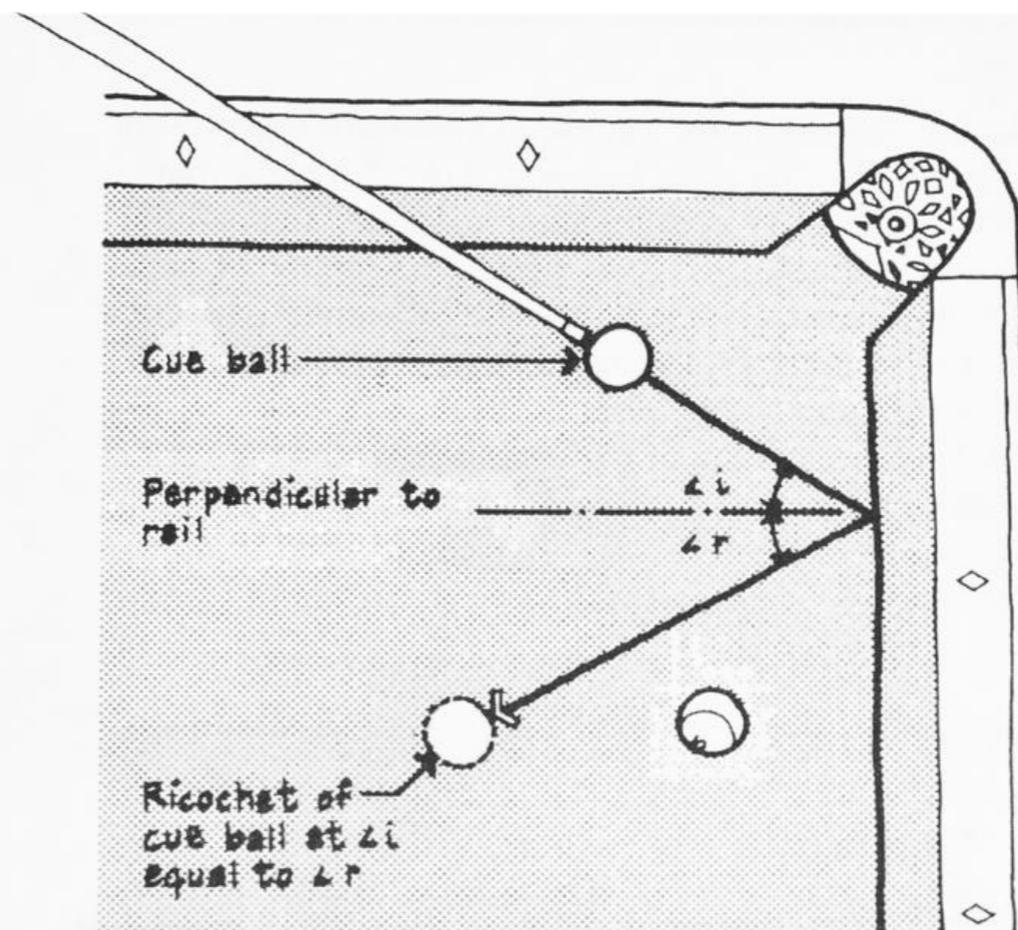
$4\lambda \times 0,343 \text{ m} = 1,372 \text{ m}$ rifletterà onde con frequenze di 1000 Hz e superiori.

Quando un sistema di onde sonore incontra un corpo incapace di vibrare le onde riflettono con una norma che è comune a tutti i fenomeni del genere e secondo la quale l'angolo d'incidenza è uguale a quello di riflessione:

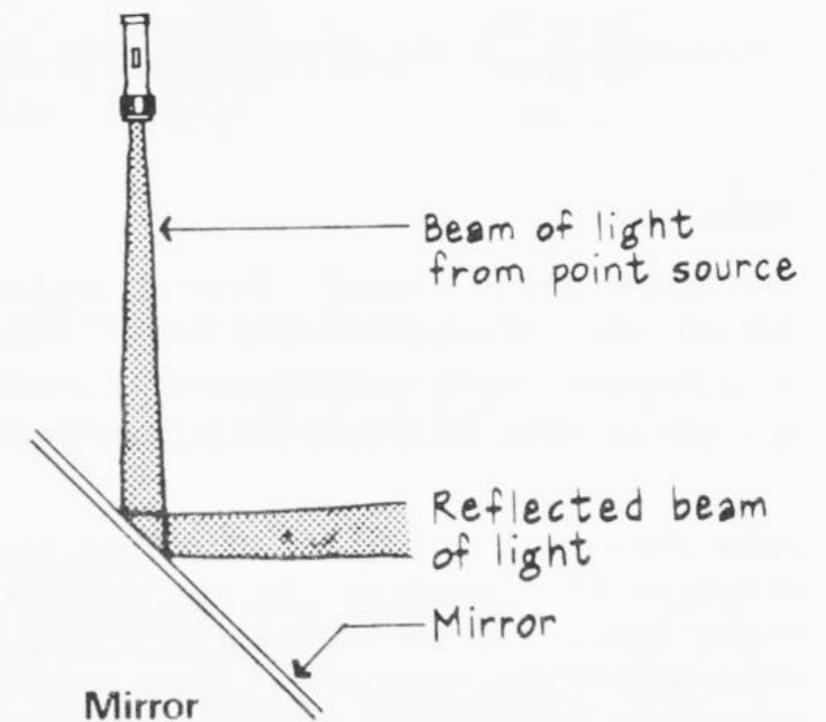


Dalle caratteristiche della superficie riflettente, dipende l'intensità e la qualità della riflessione. In ogni caso, la parte di energia che non viene riflessa è assorbita oppure rifratta.

La riflessione speculare è quella che calcoliamo giocando a biliardo oppure guardando ad uno specchio.



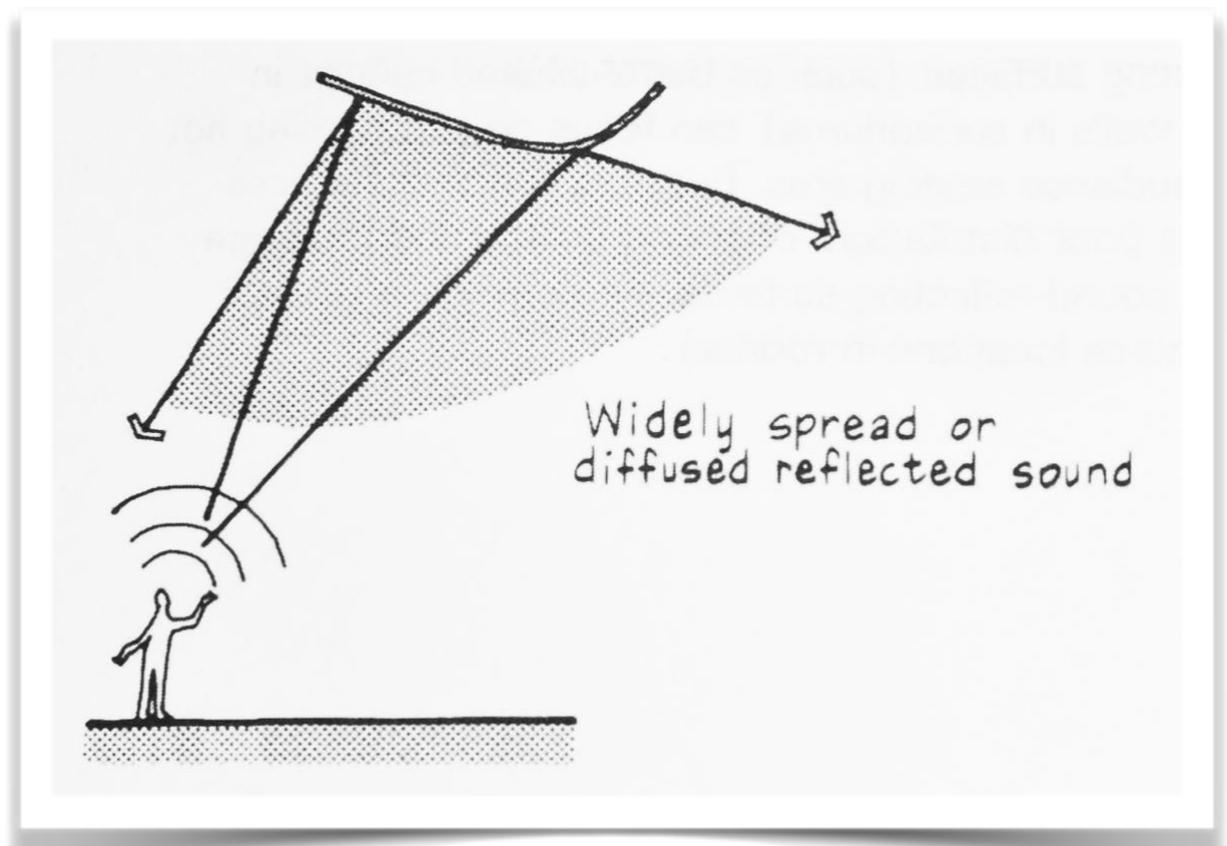
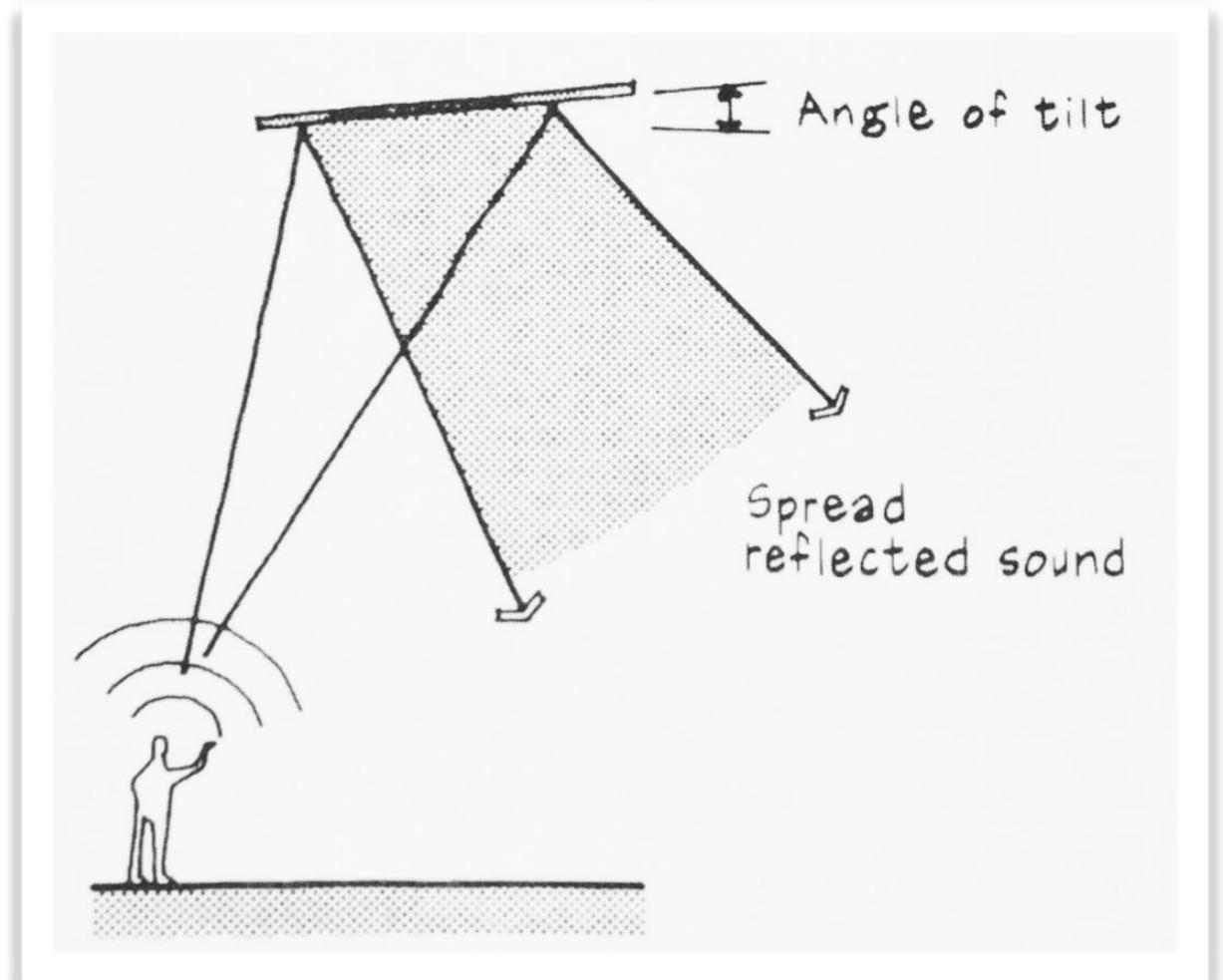
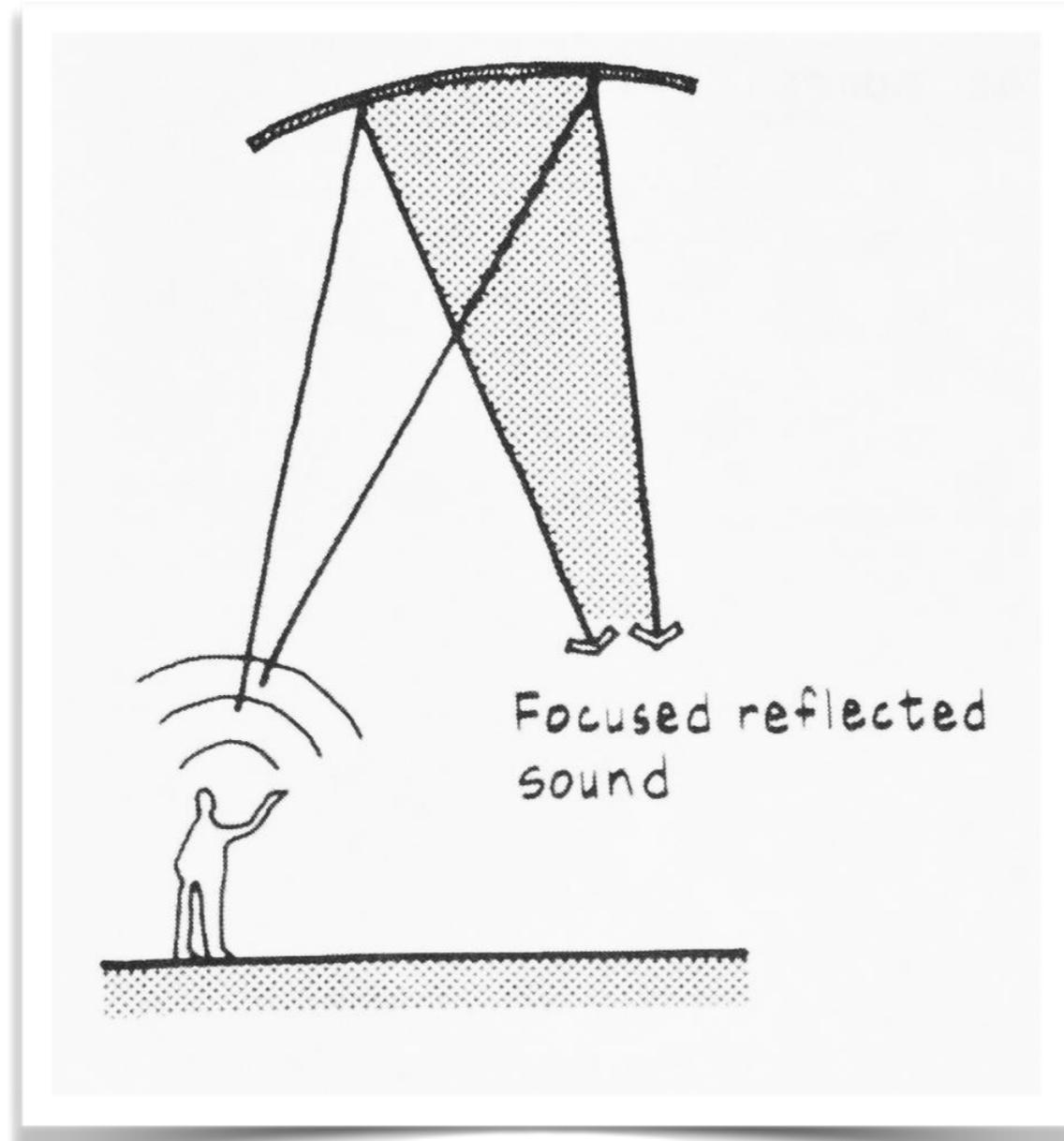
Billiard Table



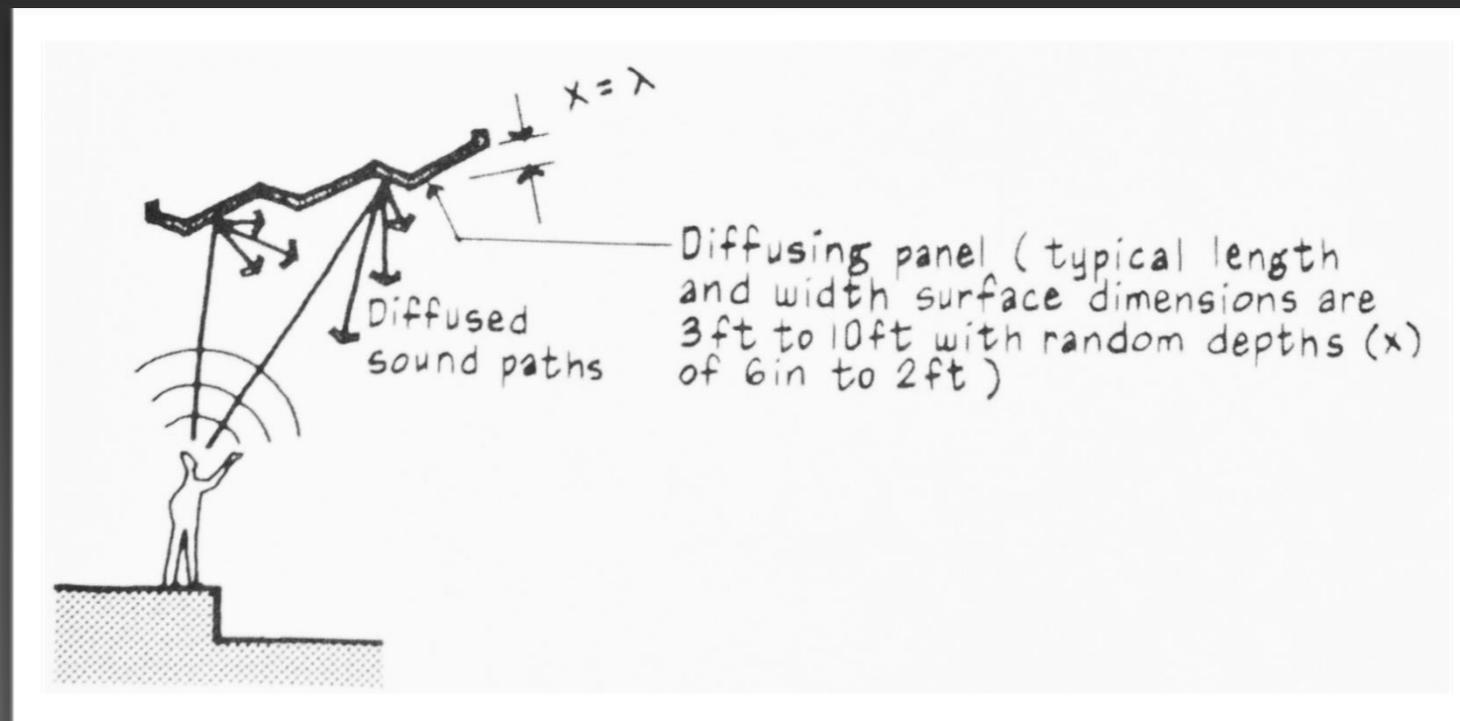
La riflessione speculare è molto utile per indirizzare le riflessioni dove vogliamo noi.

Sicuramente è più efficiente della riflessione focalizzata da una superficie concava.

Le superfici convesse possono invece allargare l'angolo di diffusione.

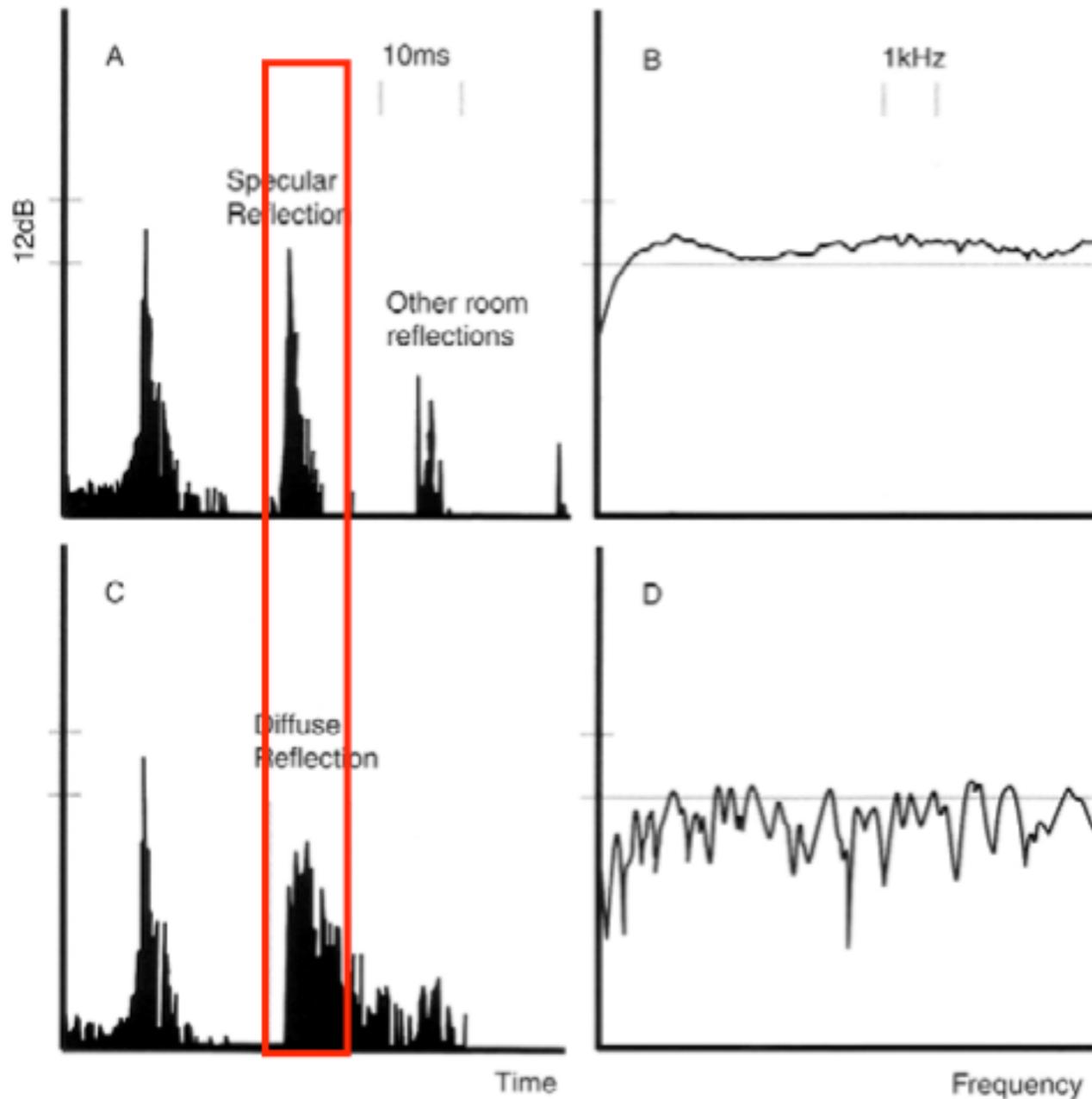


Diffusione acustica



La diffusione acustica è la redistribuzione random (o “scattering”) di un’onda sonora da una superficie. Avviene quando la superficie solida ha delle profondità di spessore comparabile alle lunghezze d’onda dell’onda incidente. In questo caso non si ha riflessione speculare ma il suono viene sparpagliato in tutte le direzioni.

Interazione tra suono diretto e riflesso (“colorazione”): risposta all’impulso e risposta in frequenza del suono riflesso da una superficie piana (sopra) e da un diffusore (sotto).



La diffusione del suono in un ambiente chiuso crea una “coda” naturale nel decadimento sonoro che viene molto apprezzata soprattutto in ambito musicale.

Diffusione acustica

Superfici convesse (poly), triangolari etc

Diffusione di Schroeder: QRD, Skyline etc

Diffusione a linee curve elaborate con simulazioni di calcolo numerico

Binary Amplitude Diffusers

Qualsiasi tipo di superficie random o pseudo-random con discrepanze.

Diffusione di Schroeder: QRD Quadratic Residue Diffusors Skyline

Dispositivo basato su buche e spessori
conseguenziali determinati dalla sequenza dei residui
quadratici

Lo spessore più alto è determinato dalla lunghezza
d'onda più lunga che dev'essere diffusa

La larghezza delle buche è circa mezza lunghezza
d'onda della più corta lunghezza d'onda che
dev'essere diffusa

$$d = n^2 \text{ mod } p$$

d : profondità di ogni buca

n : numero naturale (intero tra 0 e infinito)

p : numero primo

Quadratic-residue sequences

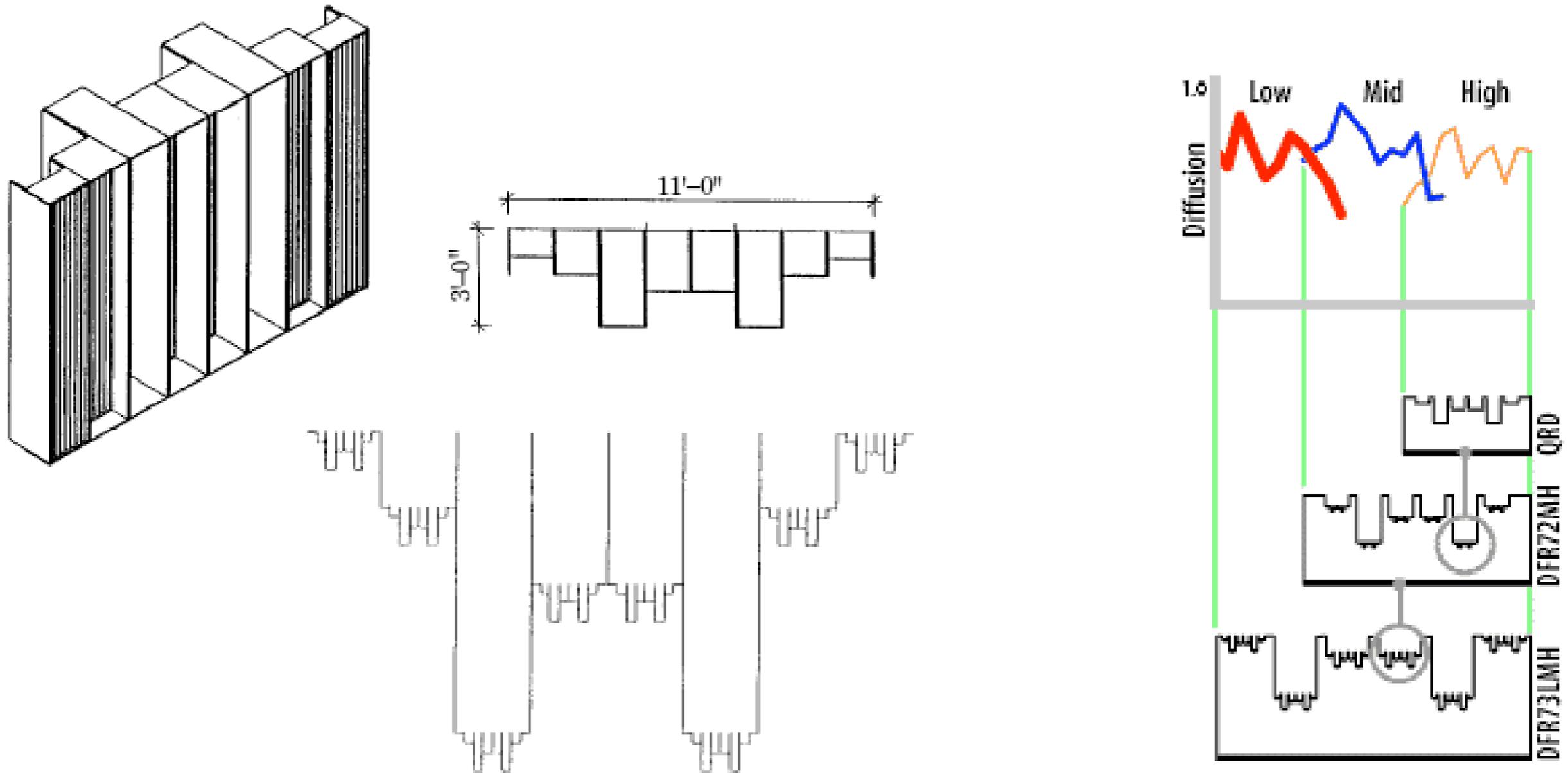
n	p						
	5	7	11	13	17	19	23
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1
2	4	4	4	4	4	4	4
3	4	2	9	9	9	9	9
4	1	2	5	3	16	16	16
5	0	4	3	12	8	6	2
6		1	3	10	2	17	13
7		0	5	10	15	11	3
8			9	12	13	7	18
9			4	3	13	5	12
10			1	9	15	5	8
11			0	4	2	7	6
12				1	8	11	6
13				0	16	17	8
14					9	6	12
15					4	16	18
16					1	9	3
17					0	4	13
18						1	2
19						0	16
20							9
21							4
22							1
23							0

Well depth or proportionality = n^2 modulo p

n = integer

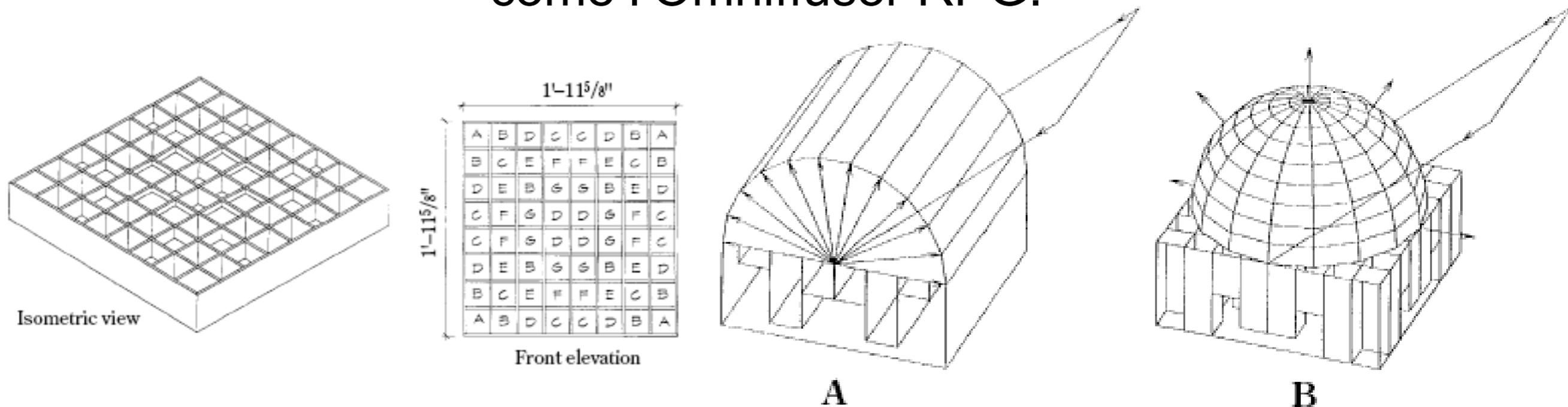
p = prime number

È molto importante capire la frequenza sulla quale agisce il diffusore. Per questo motivo, sulla falsariga della costruzione delle casse a più vie, si costruiscono diffusori a banda larga (Diffractal) che sono tipo dei frattali, ossia in ogni elemento c'è una serie di elementi sempre più piccoli per le frequenze più grandi etc.



Diffusori in 2d

La distribuzione spaziale delle riflessioni provocate da questo tipo di diffusori è a semicerchio ossia in due dimensioni. Per avere una distribuzione sferica bisognerà utilizzare diffusori in tre dimensioni come l'Omniffusor RPG.

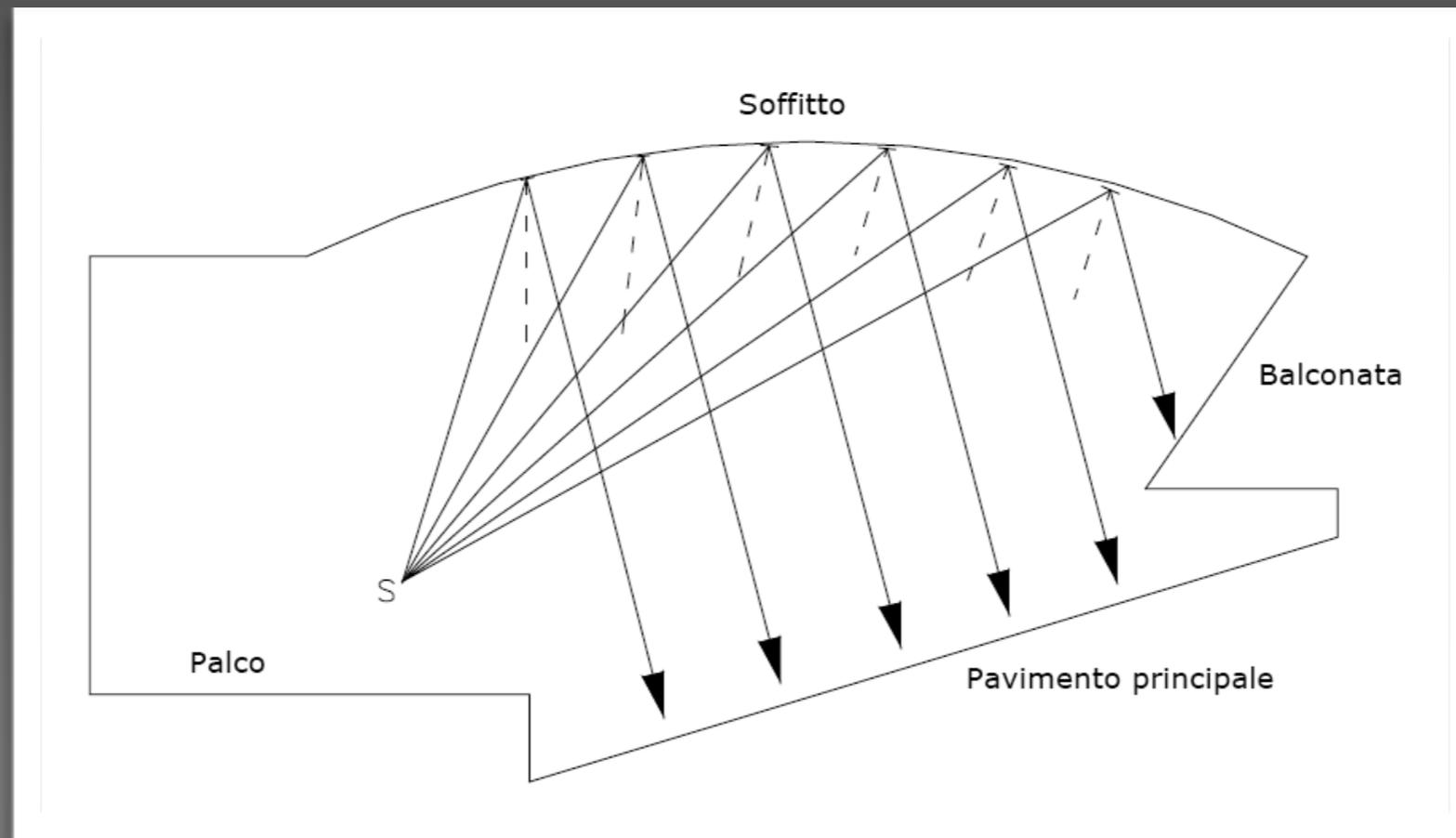


Schema dell'omniffusor

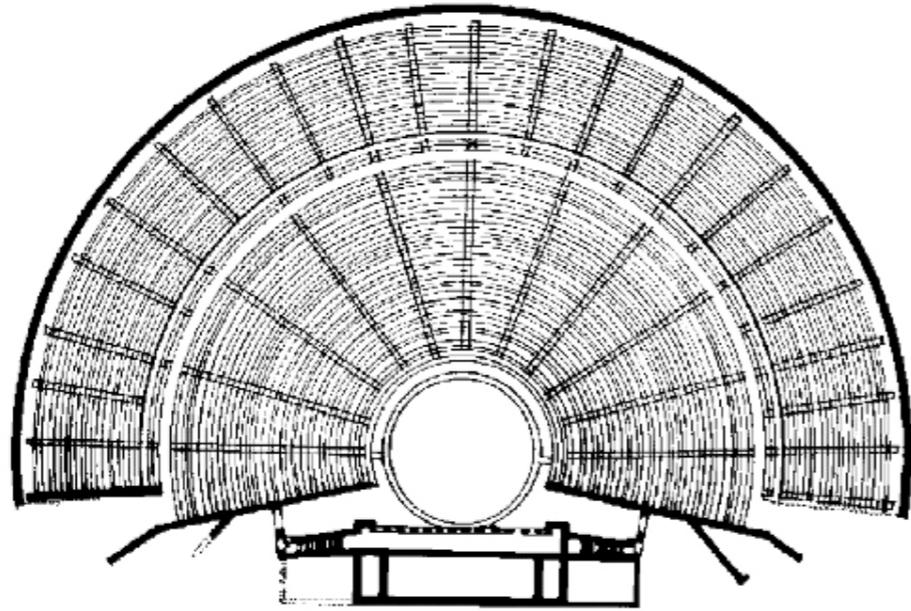
differenza tra
QRD/primitive-root
e Omniffusor in 2d

1.4 Room Acoustics: Acustica negli ambienti chiusi

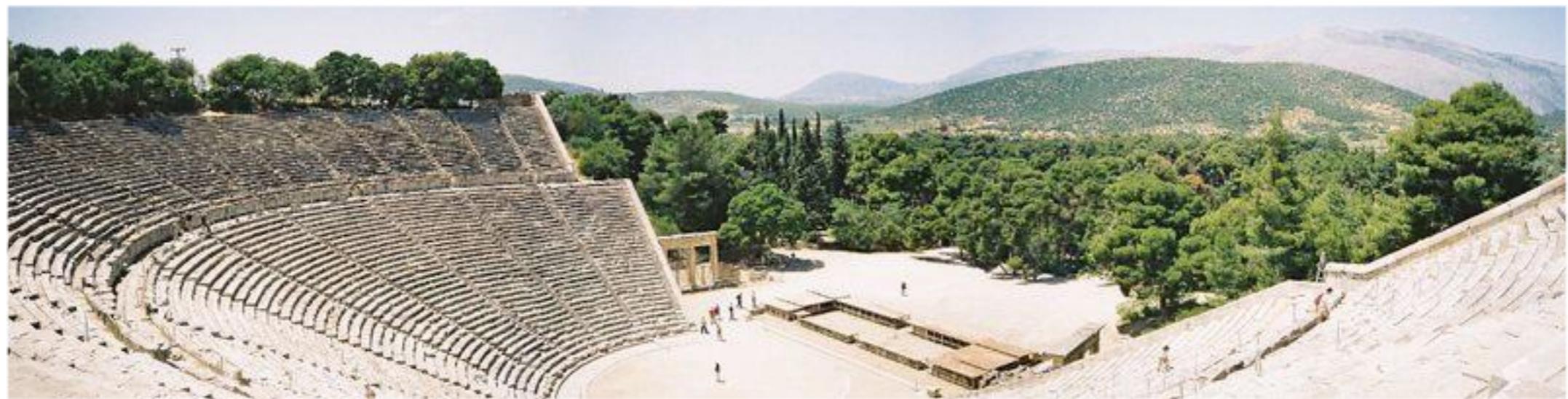
Scienza che studia la propagazione del suono in locali chiusi o comunque in presenza di oggetti capaci di causare effetti significativi di assorbimento e riflessione.



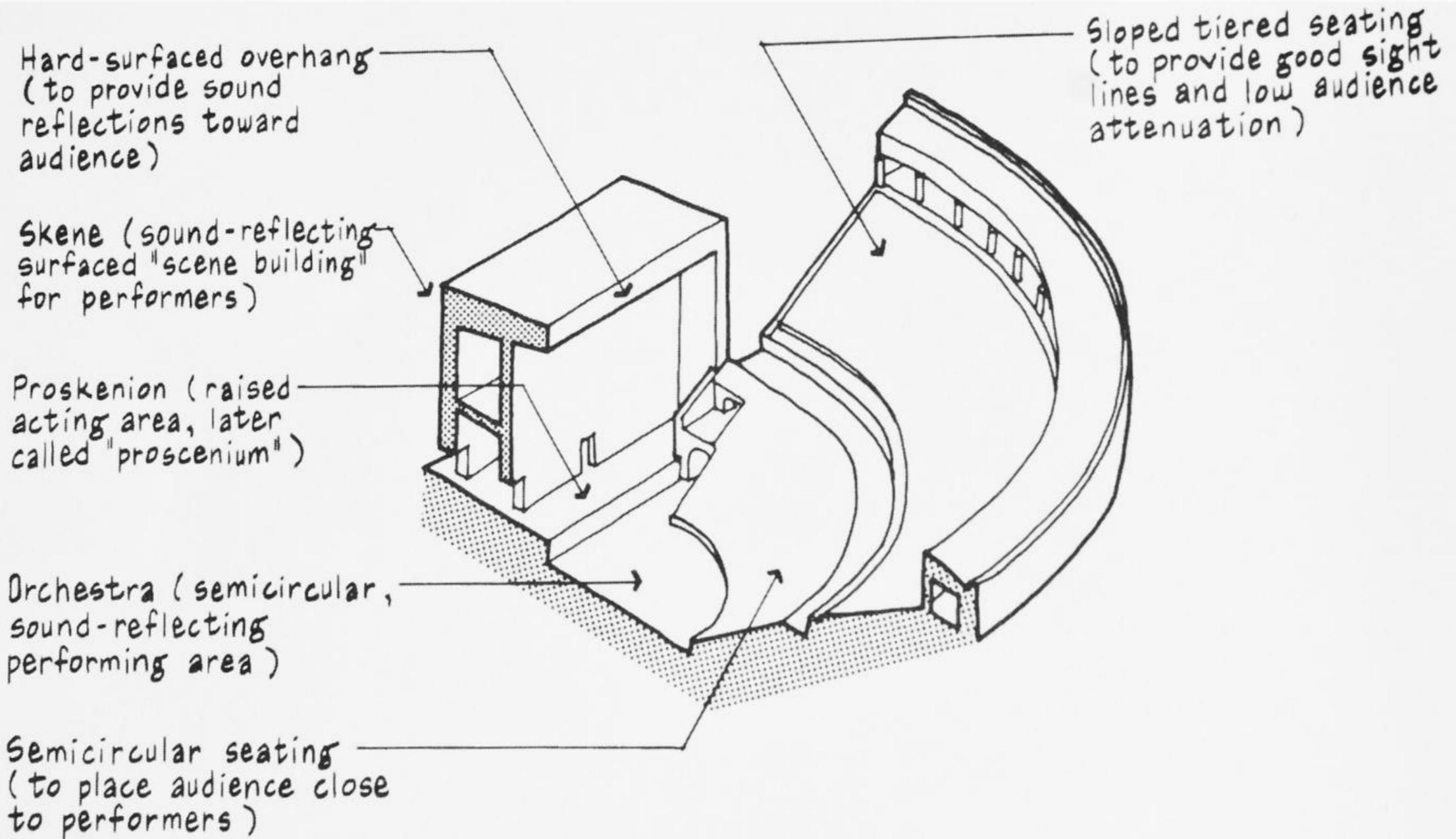
Nell'antichità: i primi teatri



teatro di Epidauro, Grecia



Il teatro greco-romano



Teatri nell'antichità:

venivano spesso collocati in posti silenziosi su fianchi di colline scoscesi;

il layout delle sedute era circolare: questo riduce la perdita di energia sonora per la distanza (al quadrato);

le gradinate venivano disposte con una grande inclinazione superiore ai 20° per fornire buona visuale e far arrivare il suono riflesso dal pavimento dell'*orchestra*, senza che ci fosse attenuazione da parte del pubblico seduto;

i posti non occupati e le teste del pubblico diffondevano il suono verso le aree adiacenti;

gli attori indossavano maschere che rinforzavano la loro voce grazie a dei megafoni conici.

Dopo i greci e i romani?

Ci furono pochissimi miglioramenti nell'acustica, a causa della mancanza dell'elettroacustica e quindi di tutti gli strumenti per misurare le grandezze fisiche legate a questa scienza.

Nel 1857 Henry per la prima volta tirò fuori il concetto di impulso, utilizzato spessissimo nella scienza moderna.

“Un singolo impulso di un dente di un ingranaggio è un rumore; da una serie di denti in successione si ha un suono continuo; e se tutti i denti sono ugualmente spazati, e la velocità della ruota dentata è uniforme, allora si ha una nota musicale”.

In seguito suggerì alcuni fattori che potevano essere legati alla buona acustica:

1. la grandezza di una stanza;
2. il livello del suono o l'intensità dell'impulso;
3. la posizione delle superfici riflettenti;
4. la natura del materiale delle superfici riflettenti.

*(È interessante notare come questi fattori siano fortemente legati a quelli descritti da **Yoichi Ando** ossia *Listening Level*, *Initial time delay*, *IACC* e *T_{IACC}*)*



Wallace Clement Sabine

1868 - 1919

Professore all'Università di Harvard
fu il primo fisico a studiare in modo
scientifico l'acustica.

Legge di Sabine



Sabine: correzione del Fogg Art Museum ad Harvard

Nella nuova “Lecture Hall” del Fogg Art Museum (Harvard University) il suono persisteva per circa 5.5 s per le multiple riflessioni sulle superfici intonacate della sala. Dato che molte persone che parlano inglese potrebbero completare 15 sillabe in 5.5 s, non c’era praticamente intelligibilità del parlato da nessuna parte nella sala.

Sabine capì che il problema della persistenza dell’energia sonora era dovuta alla grandezza della sala e ai suoi arredi, incluse le persone.

Effettuò molteplici test utilizzando canne da organo come sorgenti e altre strumentazioni. La canna da organo aveva un livello iniziale nella sala di circa 60 dB sopra il livello di percezione di un giovane uditore alla frequenza di 512 Hz.

Sabine utilizzò il suo udito disciplinato per giudicare quando la sorgente della canna d’organo cessava di essere udibile: ne misurò il tempo di decadimento con un cronografo e lo definì come *Tempo di Riverberazione*.

Coprì le sedute di materiale poroso fonoassorbente e misurò di quanto diminuiva il tempo di riverberazione nella sala.

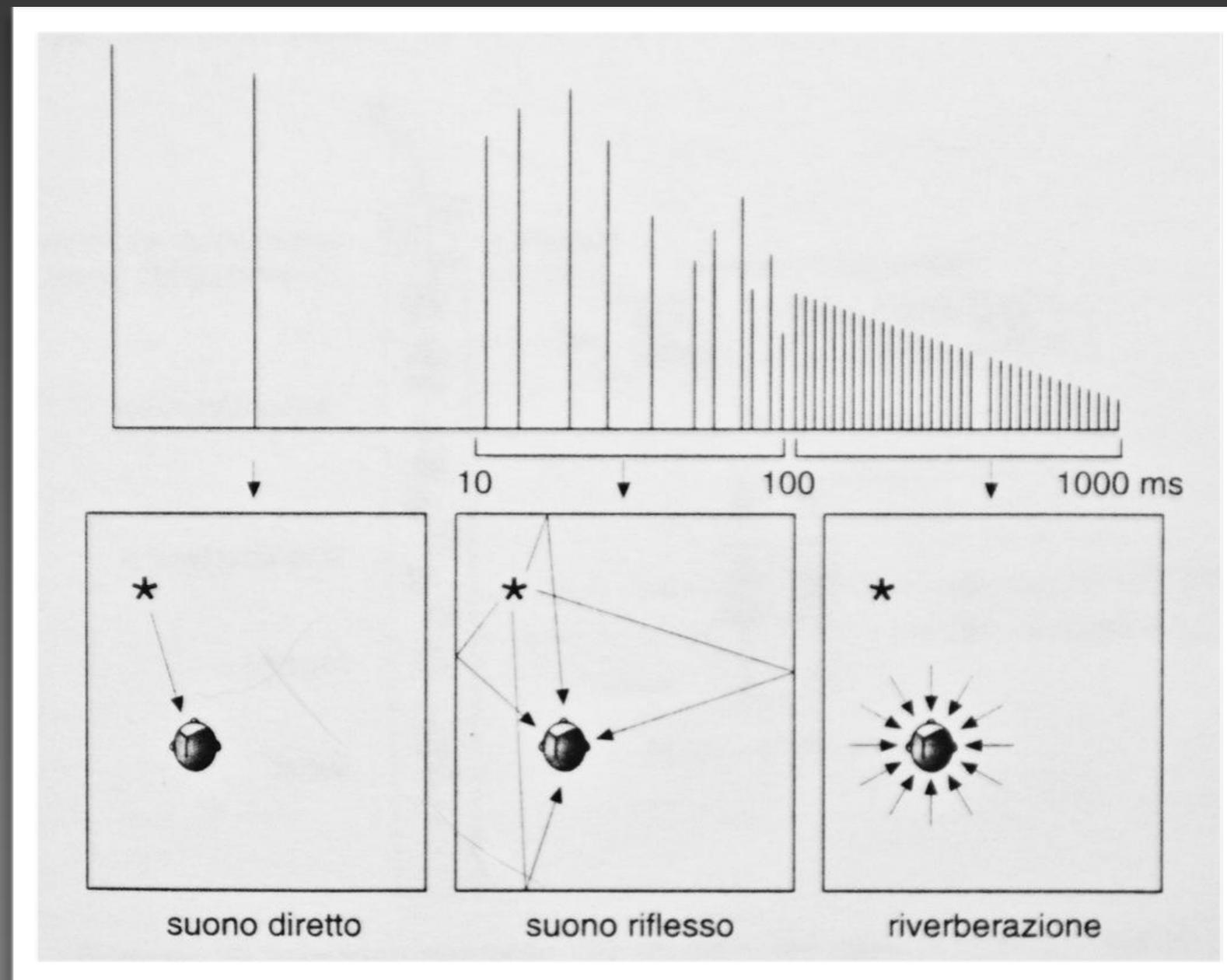


Tempo di Riverberazione RT60

tempo necessario affinché la densità di energia sonora decresca di 60 dB dal valore originario dopo che la sorgente abbia cessato di vibrare

Legge di Sabine:
$$RT60 [s] = 0.161 \frac{V [m^3]}{A [m^2]}$$

1.5 Suono in un ambiente confinato



Suono diretto

Il **Suono diretto** trasmette informazioni relative a:



1. posizione della sorgente;
2. dimensione della sorgente;
3. vero timbro della sorgente.

L'ammontare di assorbimento che si verifica quando il suono viene riflesso da una superficie non è uguale a tutte le frequenze; perciò il timbro del suono riflesso è influenzato dalle caratteristiche della superficie che ha incontrato.

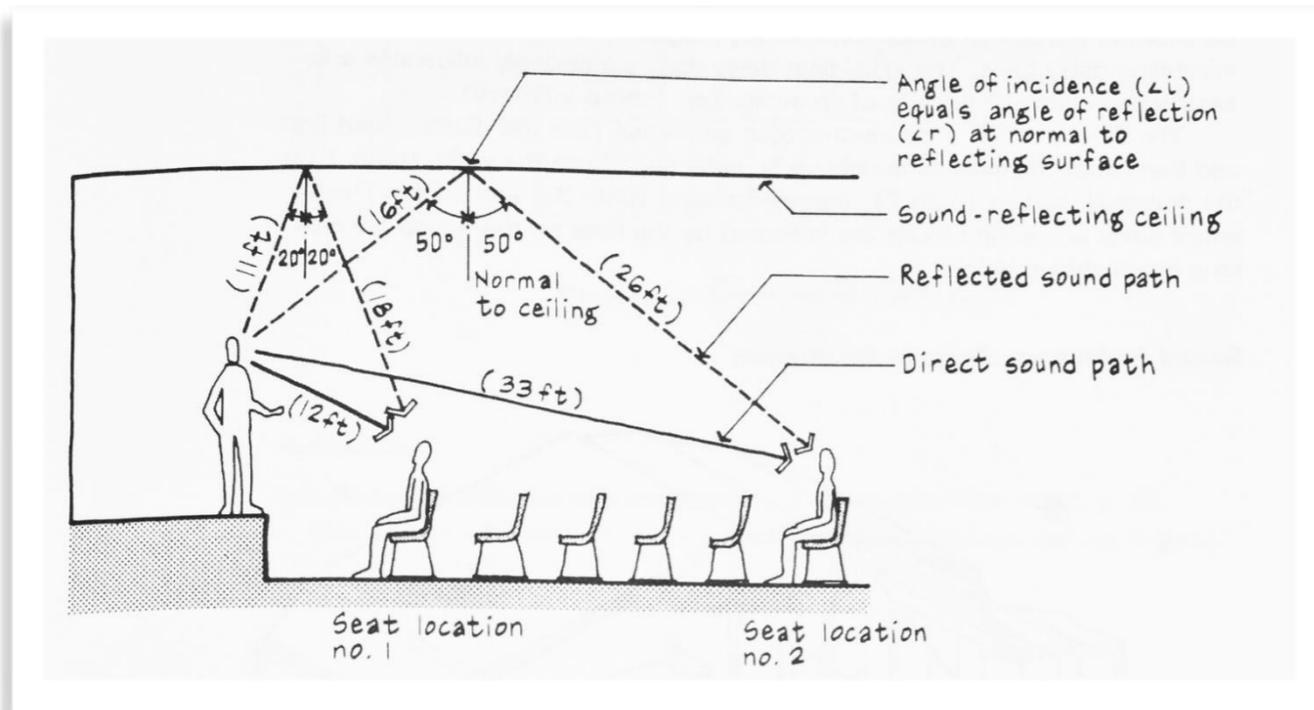
Prime Riflessioni



Le **Prime riflessioni** raggiungono l'orecchio entro 30÷80 millisecondi dal suono diretto: queste riflessioni sono il risultato di onde che hanno incontrato poche superfici prima di arrivare all'ascoltatore, e possono giungere da direzioni diverse rispetto al suono diretto.

L'intervallo di tempo che intercorre fra l'ascolto del suono diretto e l'inizio delle prime riflessioni fornisce informazioni sulla dimensione della stanza in cui si verifica l'evento sonoro: più lontane sono le superfici rispetto all'ascoltatore, maggiore sarà il tempo che il suono impiega per raggiungerle e per venire poi riflesso verso l'ascoltatore stesso.

Fusione Temporale



Le prime riflessioni che giungono all'orecchio umano entro 30÷80 millisecondi dal suono diretto, oltre a non risultare udibili, sono effettivamente **fuse con il suono diretto stesso**.

L'orecchio umano non riesce a distinguere separatamente suoni che si verificano molto ravvicinati nel tempo e considera le riflessioni come parte del suono diretto.

Il limite di tempo per la fusione temporale non è assoluto: dipende piuttosto dall'involuppo del suono. La fusione si interrompe a 4 ms nel caso di transienti, anche se può arrivare fino a 80 ms nel caso di suoni che cambiano lentamente, come ad esempio il legato dei violini.

Nonostante le prime riflessioni siano soppresse e risultino amalgamate con il suono diretto, esse modificano la nostra percezione del suono, rendendolo più pieno e più intenso.

I suoni che raggiungono l'ascoltatore in un istante successivo a 30÷80 ms dopo il suono diretto, sono stati riflessi da un numero tale di superfici diverse che cominciano a raggiungere l'ascoltatore in un flusso virtualmente continuo e da tutte le direzioni.

Queste onde ravvicinate sono dette **riverberazione**: la riverberazione è caratterizzata da una diminuzione graduale di ampiezza e dal fatto che conferisce calore e corposità al suono; inoltre contribuisce anche alla sua intensità.

A causa delle molte riflessioni, il timbro della riverberazione è molto diverso rispetto al suono diretto, e la differenza principale è un taglio delle alte frequenze e una conseguente enfaticizzazione delle basse.



Riverberazione



Persistenza del suono dopo che la sorgente sonora ha cessato di vibrare.

È causata dalla riflessione continuata delle onde sonore sulle superfici dell'ambiente in cui si propagano.

in ogni riflessione l'intensità del suono viene ridotta di un fattore $x < 1$, dopo N riflessioni risulterà ridotta di un fattore x^N :

$$I = I_0 x^{t/\Delta T} = I_0 e^{-t/\tau}$$

andamento esponenziale decrescente

Tempo di riverberazione ottimale

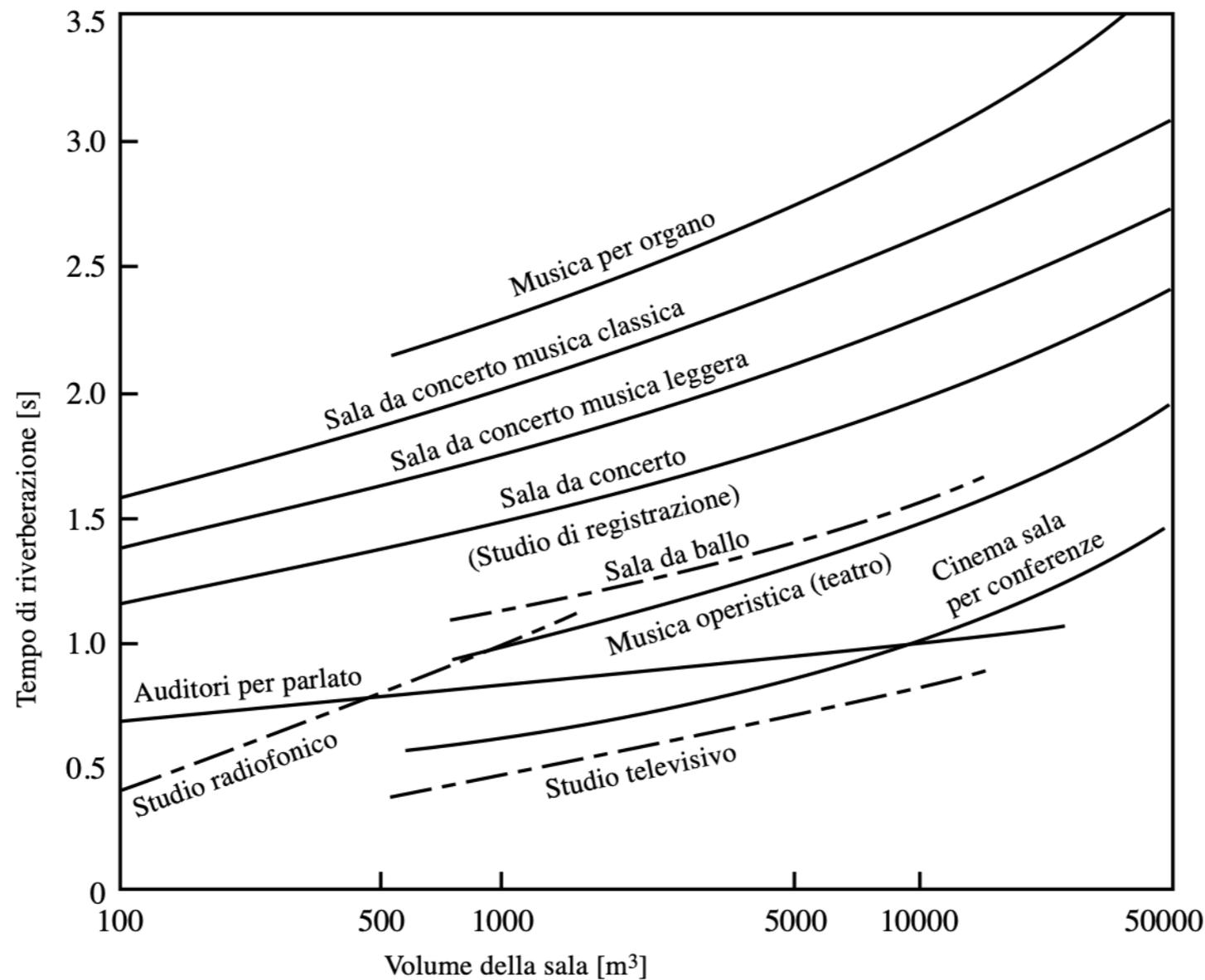
Per la migliore intelligibilità si deve avere nel punto di ascolto un'intensità sonora sufficiente ed una dispersione temporale non eccessiva del suono emesso dalla sorgente

RIVERBERAZIONE: ruolo duplice

- (+) innalza l'intensità sonora rispetto a quella del suono diretto;
- (-) aumenta la dispersione temporale, incidendo negativamente sulla comprensione delle note e dei fonemi.

Il tempo di riverberazione deve assumere un valore ottimale in modo da offrire il miglior compromesso possibile.





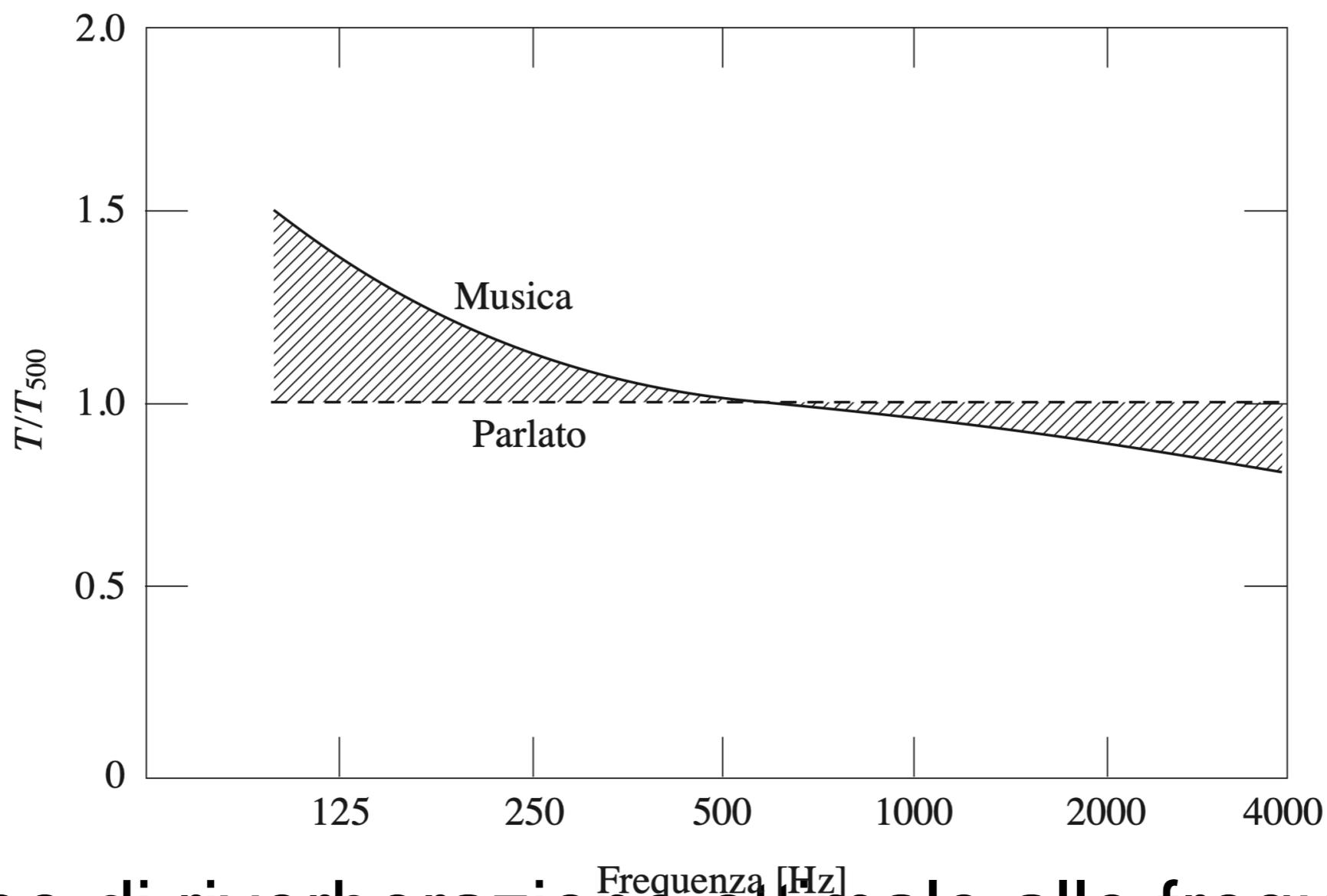
il valore ottimale cresce all'aumentare del volume della sala per una determinata destinazione d'uso:

formule empiriche
(V in m^3)

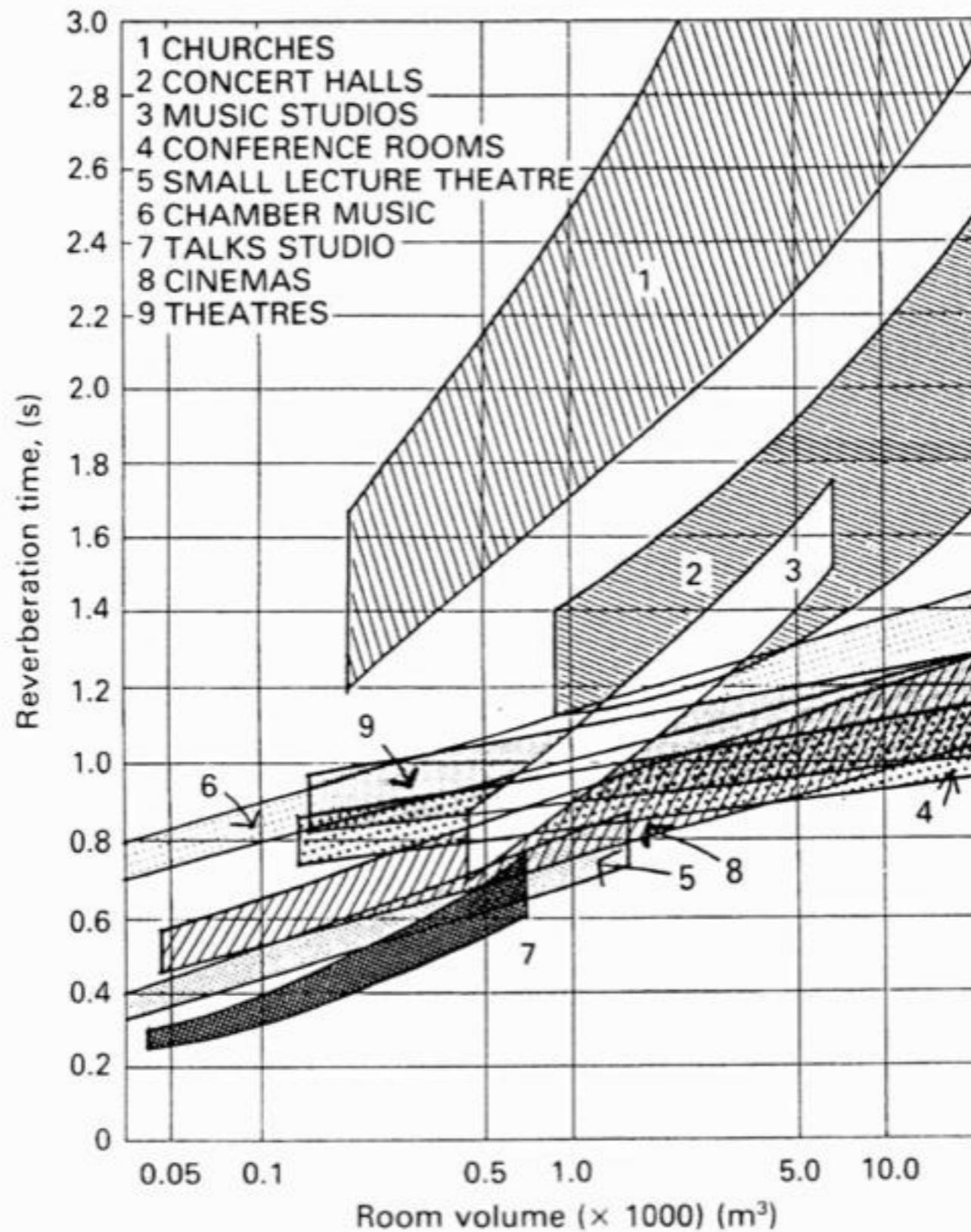
$$RT60_{parlato} = 0.1 V^{1/3}$$

$$RT60_{musica} = 0.5 + 10^{-4} V$$

andamento del tempo di riverberazione ottimale in funzione della frequenza:



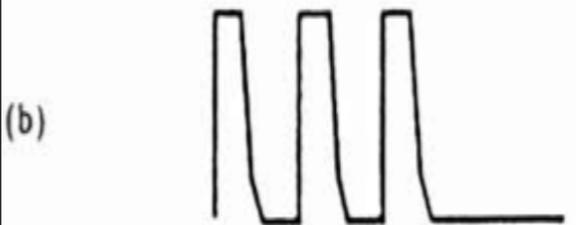
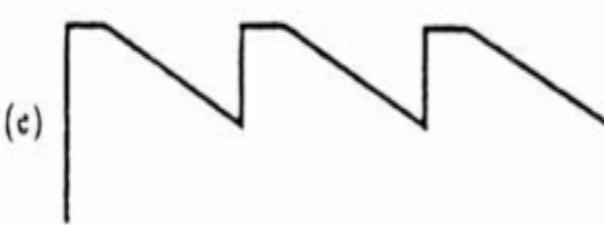
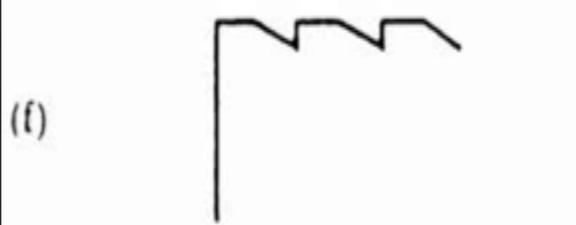
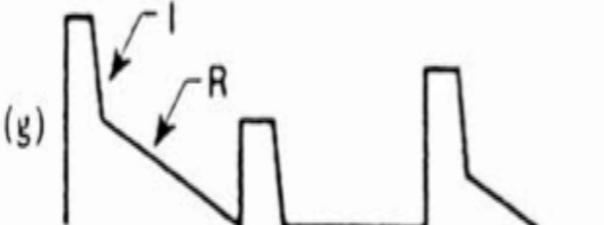
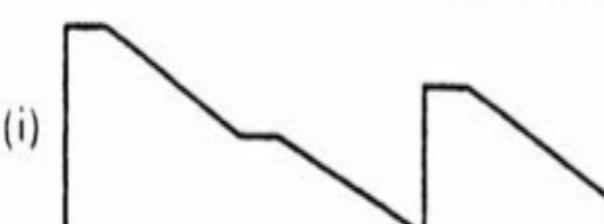
il tempo di riverberazione ottimale alle frequenze più basse può quasi raddoppiare rispetto al valore corrispondente a 500 Hz



Valori di RT60 relativi a importanti sale acusticamente efficienti

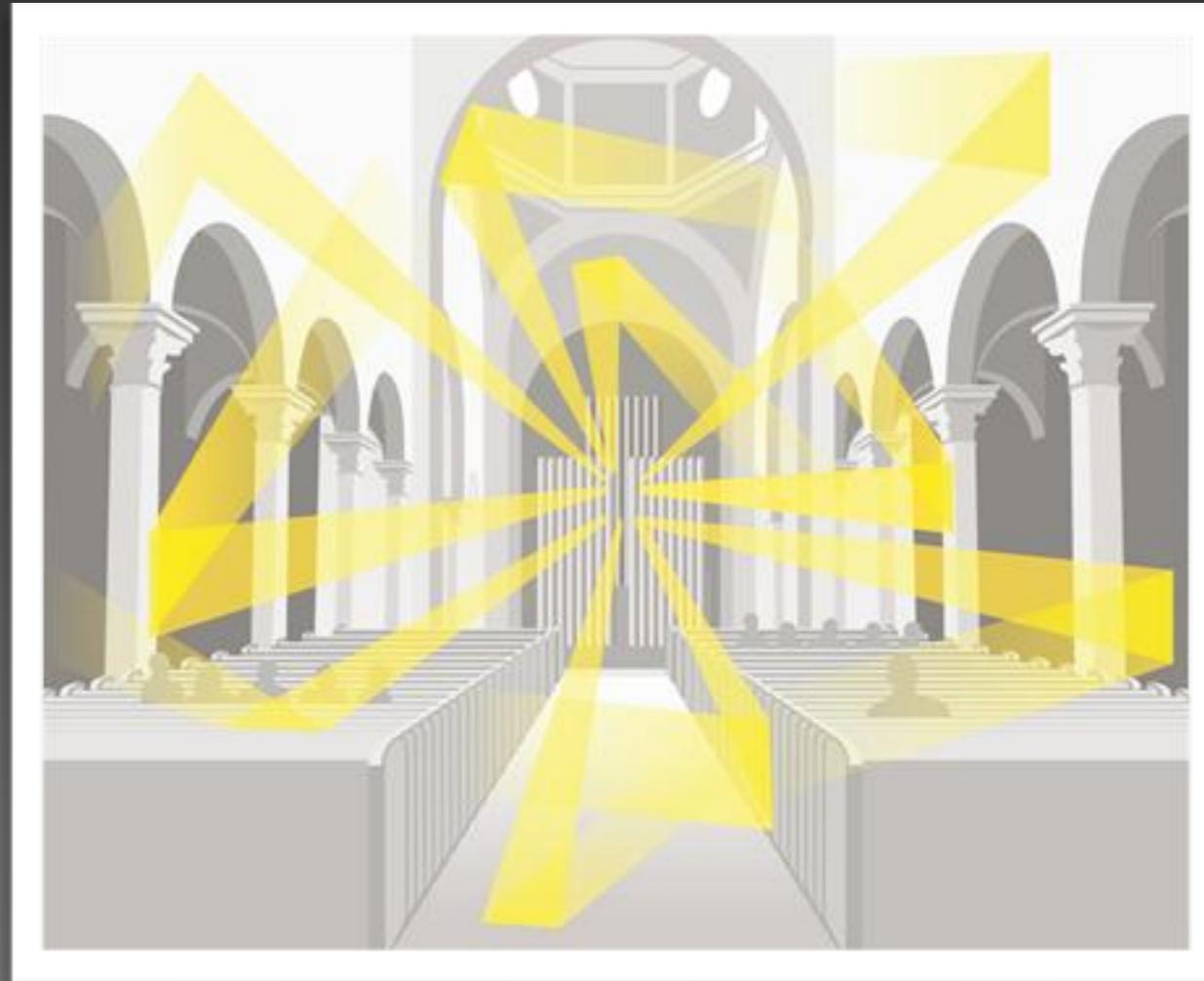
Sala	$V/10^3$ [m ³]	$S/10^3$ [m ²]	Tempo di riverber. [s] a varie frequenze [Hz]						Prima riflessione [ms]	Posti
			125	250	500	1000	2000	4000		
Gerusalemme, Binyanei Ha'oomah	24.7	2.4	2.2	2.0	1.75	1.75	1.65	1.5	13-26	3100
New York, Carnegie Hall (pre-rest.)	24.3	2.0	1.8	1.8	1.8	1.6	1.6	1.4	16-23	2800
Boston, Symphony Hall	18.7	1.6	2.2	2.0	1.8	1.8	1.7	1.5	7-15	2600
Amsterdam, Concertgebouw	18.7	1.3	2.2	2.2	2.1	1.9	1.8	1.6	9-21	2200
Glasgow, St. Andrew's Hall	16.1	1.4	1.8	1.8	1.9	1.9	1.8	1.5	8-20	2100
Philadelphia, Academy of Music	15.7	1.7	1.4	1.7	1.45	1.35	1.25	1.15	10-19	3000
Bristol, Colston Hall	13.5	1.3	1.85	1.7	1.7	1.7	1.6	1.35	6-14	2200
Bruxelles, Palais des Beaux Arts	12.5	1.5	1.9	1.75	1.5	1.35	1.25	1.1	4-23	2200
Göteborg, Konzerthus	11.9	1.0	1.9	1.7	1.7	1.7	1.55	1.45	22-23	1400
Lipsia, Neues Gewandhaus	10.6	1.0	1.5	1.6	1.55	1.55	1.35	1.2	6-8	1600
Basilea, Stadt-Casino	10.5	0.9	2.2	2.0	1.8	1.6	1.5	1.4	6-16	1400
Cambridge (Mass.), Kresge Auditorium	10.0	1.0	1.65	1.55	1.5	1.45	1.35	1.25	10-15	1200
Buenos Aires, Teatro Colon	20.6	2.1	—	—	1.7	—	—	—	13-19	2800
New York, Metropolitan Opera	19.5	2.6	1.8	1.5	1.3	1.1	1.0	0.9	18-22	2800
Milano, Teatro alla Scala	11.2	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.0	0.9	12-15	2500

Fig. 1.3. Tempi di riverberazione alle varie frequenze di alcune sale da concerto (da KINSLER, *Fundamentals of Acoustics* 4^a ed.).

	Condizioni acustiche		Note suonate lentamente		Note suonate velocemente	
	Tempo di riverberazione	Rapporto tra Loudness: suono diretto vs. suono riverberante	Risultato acustico-musicale	definizione e pienezza dei toni	Risultato acustico-musicale	definizione e pienezza dei toni
Toni alla stessa loudness	corto	grande	(a) 	Alta definizione irrilevante pienezza dei toni	(b) 	Alta definizione irrilevante pienezza dei toni
	lungo	medio	(c) 	Alta definizione una piccola pienezza dei toni	(d) 	Alta definizione una piccola pienezza dei toni
	lungo	piccolo	(e) 	Media definizione alta pienezza dei toni	(f) 	Bassa definizione alta pienezza dei toni
Toni a diverse loudness	lungo	medio	(g) 	Alta definizione una piccola pienezza dei toni	(h) 	Alta definizione una piccola pienezza dei toni
	lungo	piccolo	(i) 	Bassa definizione alta pienezza dei toni	(j) 	Molto bassa definizione alta pienezza dei toni



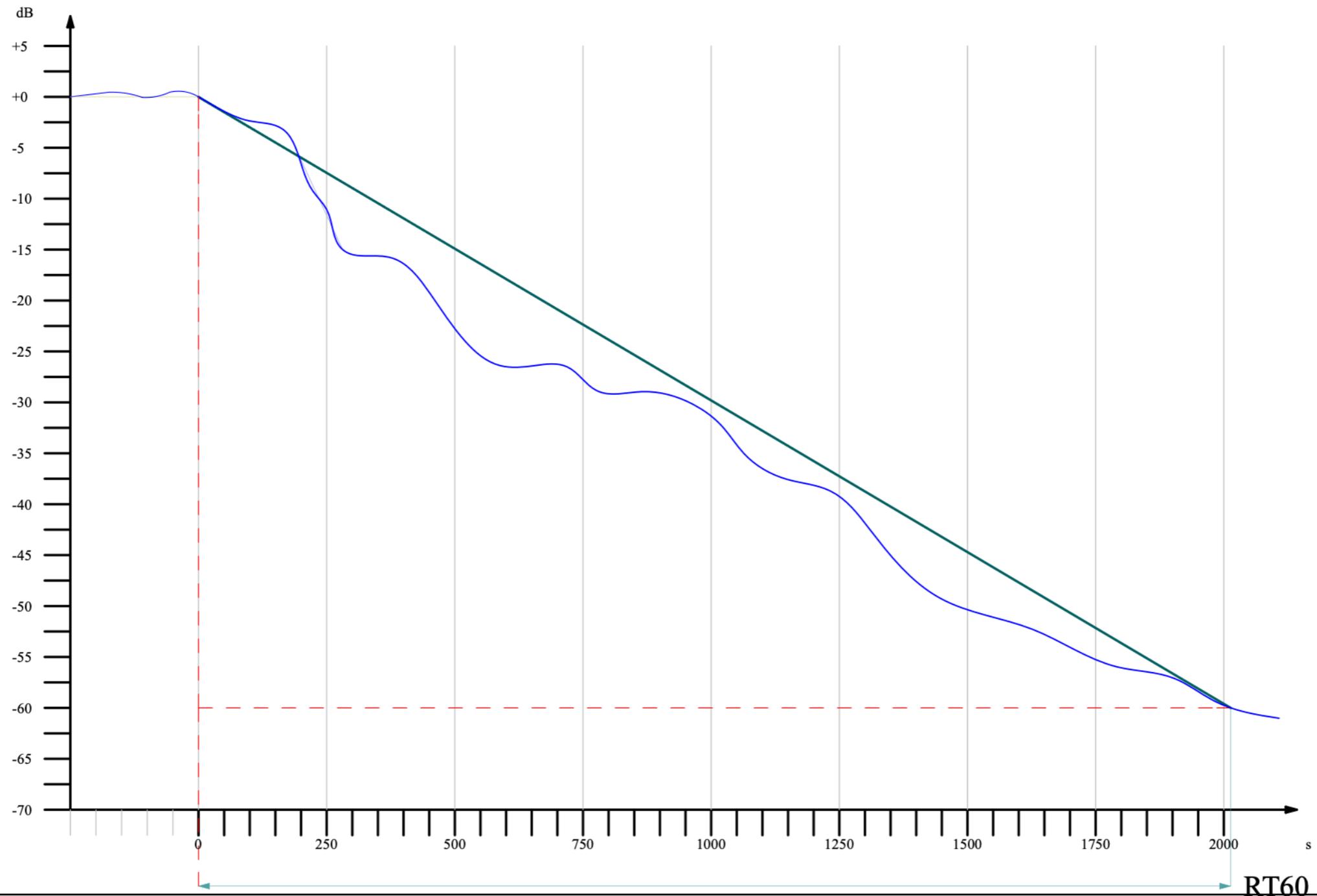
1.6 Tempi di riverberazione



parametri relativi ai tempi di riverberazione tratti dalla
normativa ISO3382

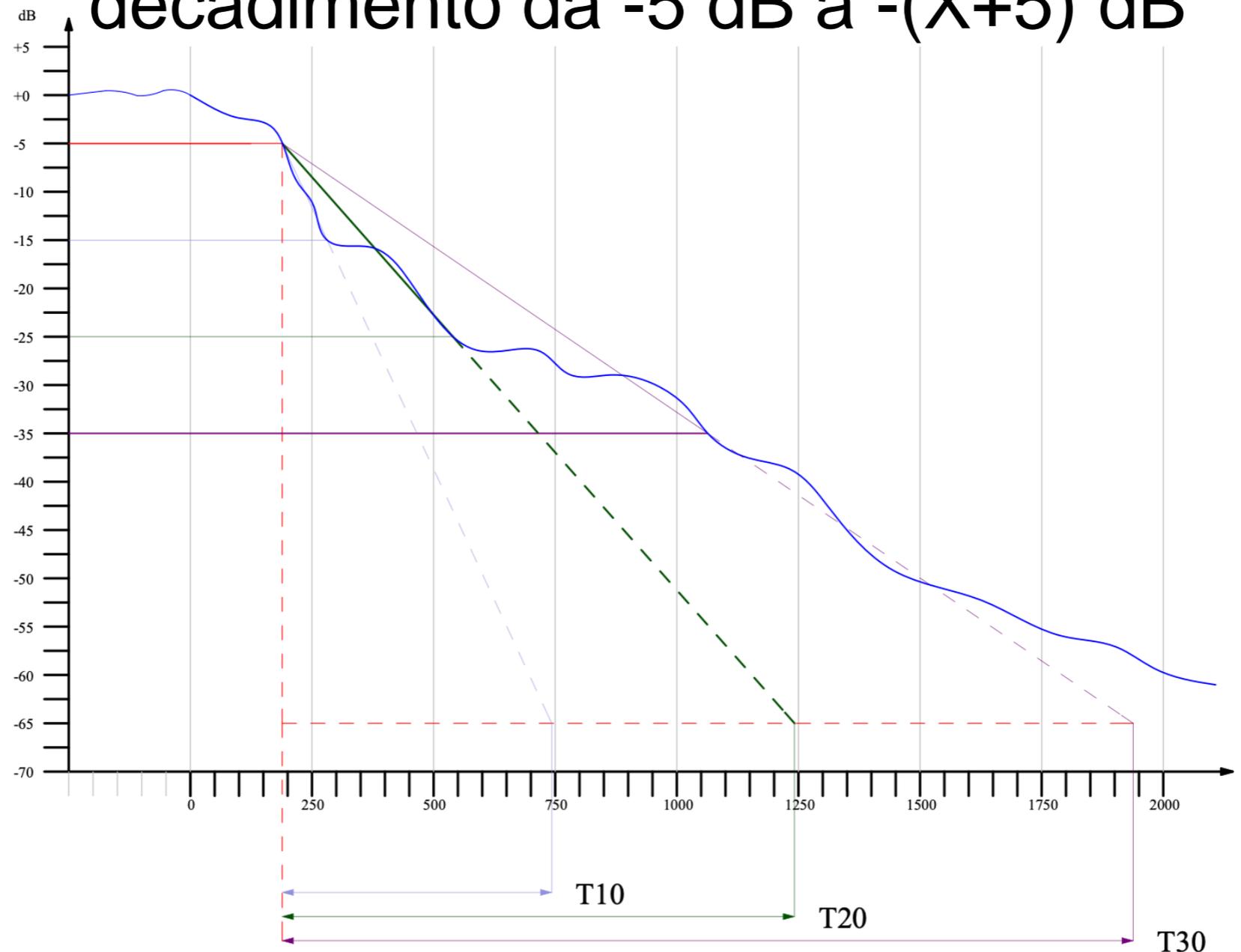


RT60



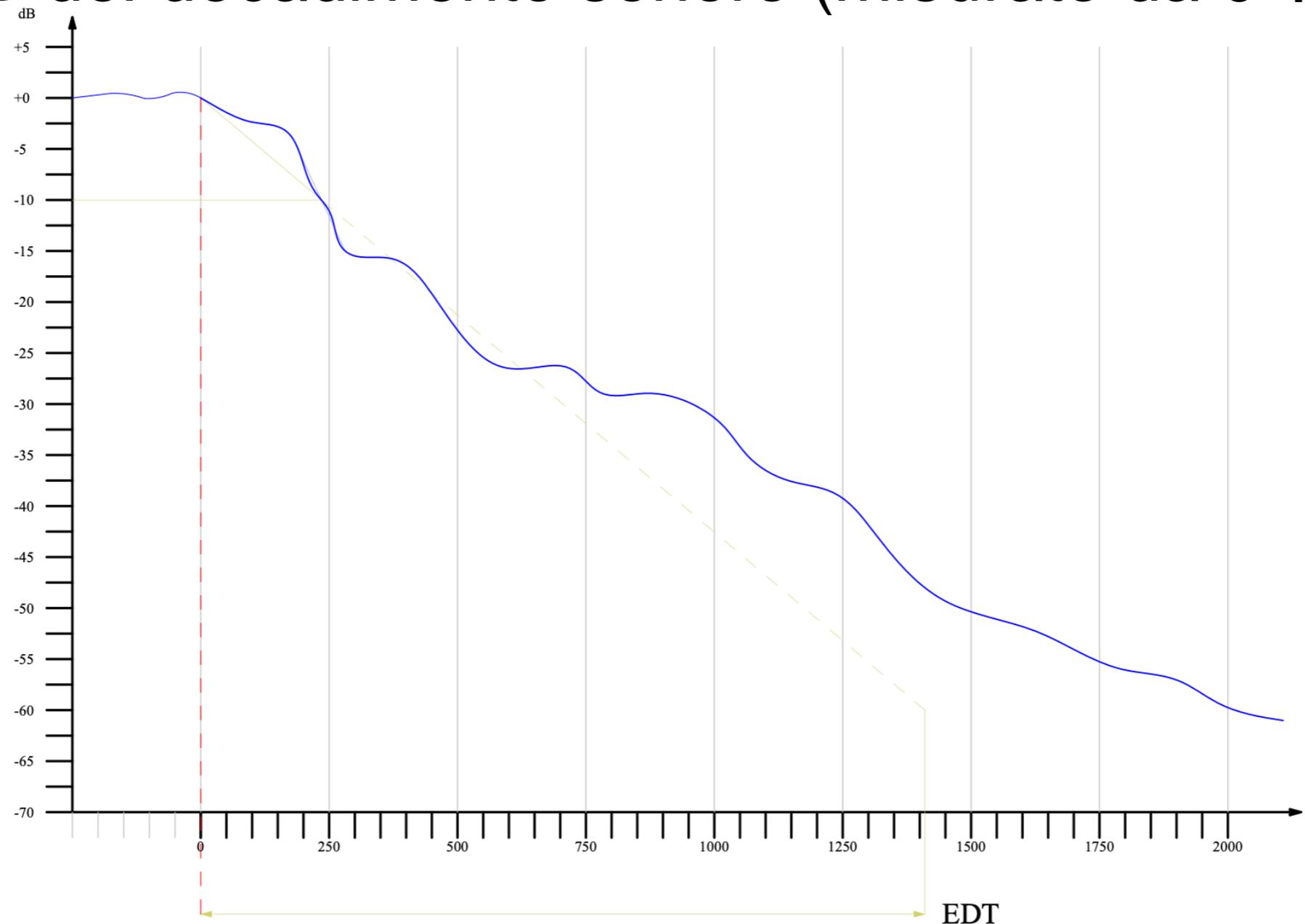
T10 - T20 - T30 - TX

è pari a $60/X$ volte il tempo di riverberazione calcolato sul decadimento da -5 dB a $-(X+5)$ dB



EDT

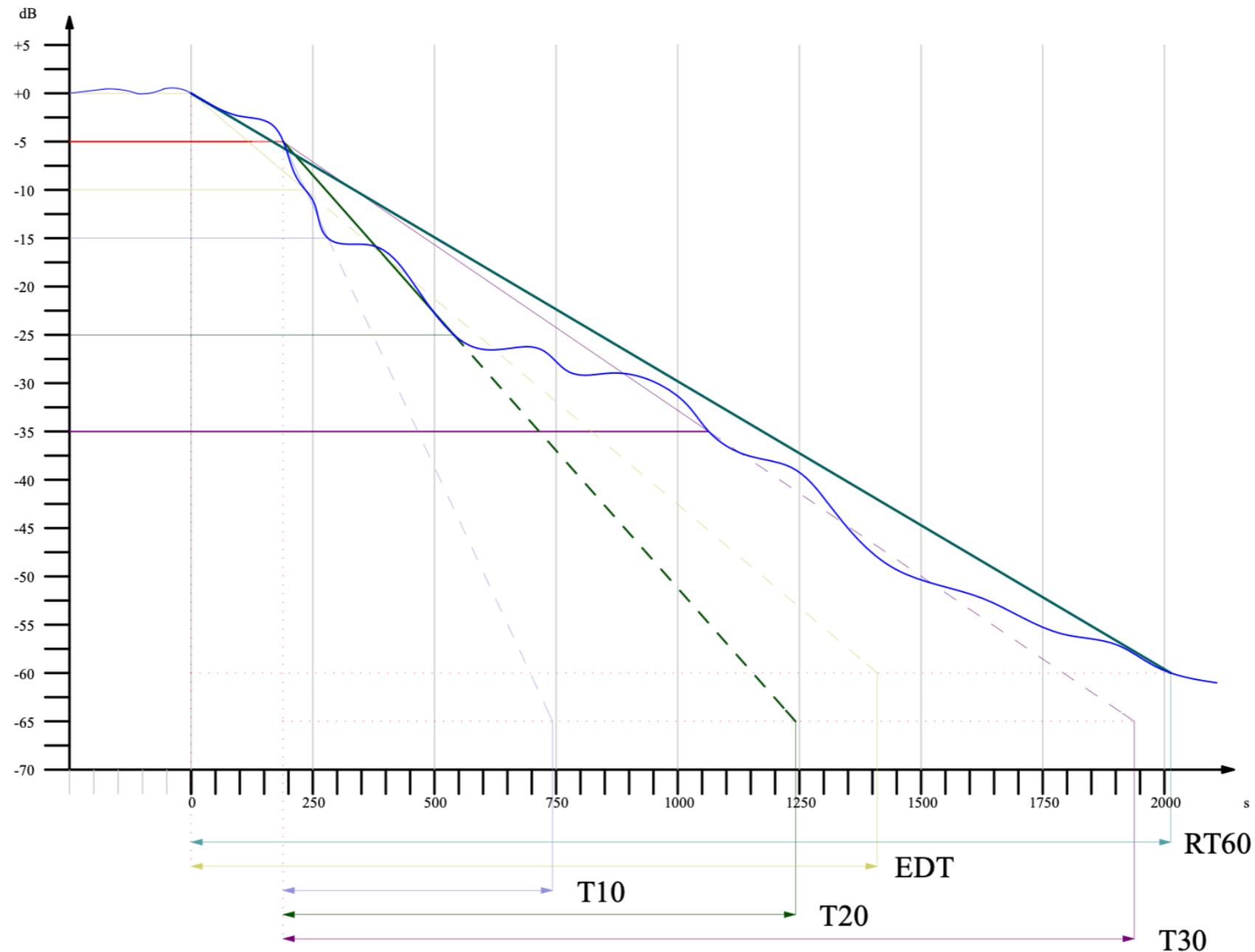
è pari a sei volte il tempo di riverberazione calcolato sui primi 10 dB del decadimento sonoro (misurato da 0 ÷ -10 dB)



Visualizzazione

Totale

Tutti i tempi di riverberazione per questo decadimento



Un decadimento di un campo acustico perfettamente diffuso è di tipo esponenziale (come il fenomeno della riverberazione) e quindi è una retta nella scala dei dB: in questo caso tutti i parametri per stimare il tempo di riverberazione sono uguali (EDT, RT60, Txx).

- **Il confronto tra i vari parametri ci dà una stima della diffusione dell'ambiente.**
- Se un ambiente è ad esempio di due volumi si nota parecchio la discrepanza tra i parametri lunghi e brevi.
- È fondamentale studiare anche il comportamento in frequenza dell'RT.

Considerazioni su RT

- T20 e T30 sono poco variabili con la posizione invece l'EDT risente del suono diretto e delle prime riflessioni e quindi è molto più variabile.
- L'EDT è un parametro più vicino dell'RT60 alla **percezione soggettiva della riverberazione** durante le esecuzioni musicali, alla **chiarezza** degli attacchi e ad altre sensazioni psicoacustiche soggettive.
- Le sale per la musica tendono ad avere una riverberazione uniforme con la frequenza mentre le sale d'opera presentano in genere più riverberazione alle frequenze gravi.
- Le sale con estese superfici di legno presentano la massima riverberazione alle frequenze medie.
- Alle frequenze acute ($\geq 4\text{KHz}$) RT diminuisce sempre a causa dell'assorbimento dell'aria.

1.7 Altri parametri acustici

G_{ts} TIACC
L_f IACC
Clarity
C50
BR
Dir SPL
SPL
C80
ITD
Definition
G
W_{IACC}
Tot SPL₅₀
Al_{cons} STI



Leo Beranek

1962: *Music, Acoustics and Architecture*

Analisi di 100 tra le più importanti
concert halls.

Tentativo di classificazione delle
sale da concerto utilizzando
parametri oggettivi.



Il tempo di riverberazione è un parametro fondamentale, ma non è l'unico adatto a valutare l'acustica di un ambiente.

Introduzione di nuovi parametri per l'acustica ambientale



Spazialità

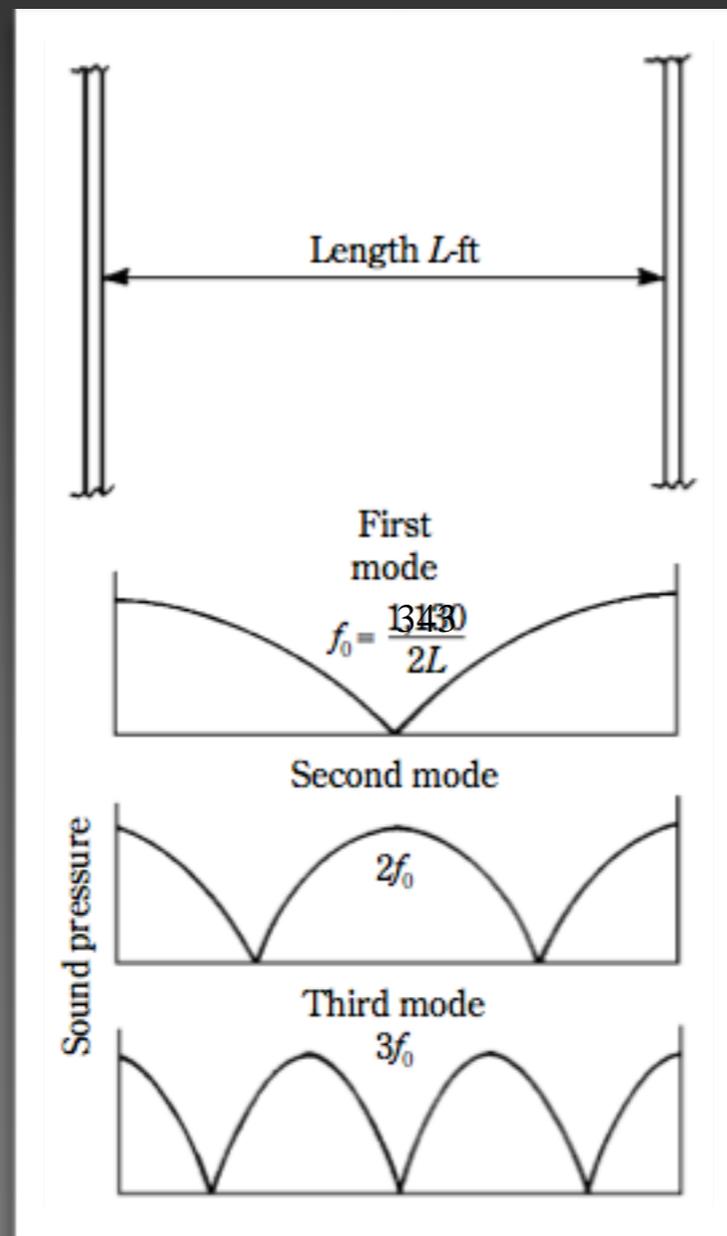
Lo studio di Beranek chiarì la maggior parte dei fattori temporali, ma non studiò la parte spaziale e quindi binaurale.

Dagli anni '70 circa si cominciarono ad investigare gli aspetti spaziali del suono con:

1. Barron (1971): investigò la “sensazione spaziale” o la sensazione di “involuppo” del campo sonoro in relazione al coefficiente IACC (Inter Aural Cross Correlation);
2. Damaske e Ando (1972): proposero un metodo per calcolare l'IACC per i campi acustici;
3. Ando e Kageyama (1977): investigarono le preferenze soggettive in relazione a fattori fisici, che furono calcolati dalle espressioni matematiche per il suono che arriva ad entrambe le orecchie;
4. Ando (1983): pubblicò una teoria di preferenza soggettiva in relazione ai quattro fattori “ortogonali” di un campo acustico, permettendo il calcolo di una scala di valori per ogni posto;
5. Cocchi, Farina e Rocco (1990): confermarono la teoria di Ando per una sala esistente.
6. Sato Mori e Ando (1997): riconfermarono la teoria più chiaramente grazie a giudizi di ascolto comparato in una sala esistente, scambiando le sorgenti sul palco invece che cambiando seduta. Introdussero il τ_{IACC} , ossia l'*interaural delay* del IACC, per l'*image shift* della sorgente sonora.

Attributo Soggettivo	Criterio di misura oggettiva	Parametri utilizzati
Chiarezza e trasparenza armonica	Rapporto tra energia vicina e lontana dal suono diretto	Criteri energetici (C80, C50, D50, t_s , G)
Riverberazione	Decadimento dell'energia sonora	Tempi di riveberazione (T30, T20, T10, EDT)
Spazialità del campo acustico	Energia Laterale, dissimilarità dei segnali alle due orecchie	Spazialità mono e binaurale (IACC, L_f , ASW, LEV, W_{IACC} , T_{IACC})
Intimità	Distanza, ritardo della prima riflessione e livello sonoro	Tempo di ritardo iniziale (ITDG)
Loudness	Livello sonoro	Livelli sonori e rinforzo sonoro (G, DirSPL, TotSPL, D/R ratio)
Calore	Relazione tra riverberazione alle frequenze gravi e medie	Bass Ratio (BR)
Intelligibilità	Intelligibilità e comprensione del parlato	Parametri di intelligibilità (STI, RaSTI, ALcons)

1.8 Risonanze modali e onde stazionarie



Onde Stazionarie

Un' onda stazionaria è una perturbazione periodica di un mezzo materiale, le cui oscillazioni sono limitate nello [spazio](#). In pratica non c'è propagazione nello spazio.

Le onde stazionarie sono il risultato dell'interferenza tra onde progressive e regressive sinusoidali, aventi la stessa [frequenza](#).

Una caratteristica delle onde stazionarie è che ad esse non è associato alcun trasporto di [energia](#).



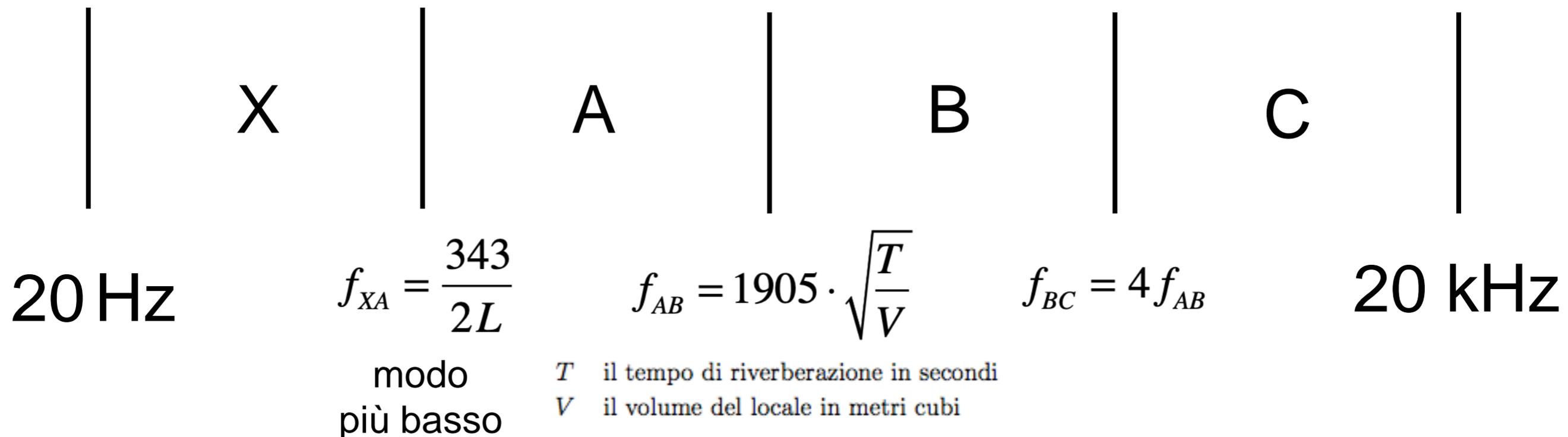
Divisione spettro udibile

REGIONE X: non c'è rinforzo modale

REGIONE A: modi normali (onde acustiche - *wave acoustics*)

REGIONE B: fenomeni di diffrazione e diffusione (regione transizione)

REGIONE C: riflessione speculare (raggi acustici - *ray acoustics*)



Esempio stanza

L 6.7 x W 5.5 x H 4.3 m

T = 0.5 s

Regione X : da 0 a 26 Hz

Regione A : da 26 a 107 Hz

Regione B : da 107 a 428 Hz

Regione C : da 428 a 20000 Hz.

$$f_{XA} = \frac{c}{2\lambda} = \frac{343 \text{ [m/s]}}{6.7 \cdot 2 \text{ [m]}} \approx 26\text{Hz}$$

$$f_{AB} = 1905 \cdot \sqrt{\frac{T}{V}} = 1905 \cdot \sqrt{\frac{0.5}{6.7 \times 5.5 \times 4.3}} \approx 107\text{Hz}$$

$$f_{BC} = 4 f_{AB} = 107 \times 4 = 428\text{Hz}$$

...ricordarsi...

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{343}{\lambda}$$



Effetto della misura del locale

riducendo il volume del locale, aumenta il limite inferiore della regione A e quindi si impoverisce la risposta dell'ambiente alle basse frequenze

più il locale è piccolo, più è ampia la porzione dello spettro udibile dominata dalle risonanze modali

in tal caso le frequenze di risonanza risulteranno sempre più spaziate causando irregolarità nella risposta della stanza ed un aumento della colorazione del suono



Wave Acoustics

Ogni locale può essere modellizzato come un risonatore acustico complesso, avente un infinito numero di modi di vibrazione, ciascuno con una ben precisa frequenza di risonanza: ogniqualvolta una di queste frequenze viene prodotta all'interno del locale, ne risulterà una corrispondente onda stazionaria.

E' dimostrabile che l'aria racchiusa in una stanza rettangolare possiede un infinito numero di modi normali di vibrazione. Le frequenze alle quali occorrono sono date dall'equazione:

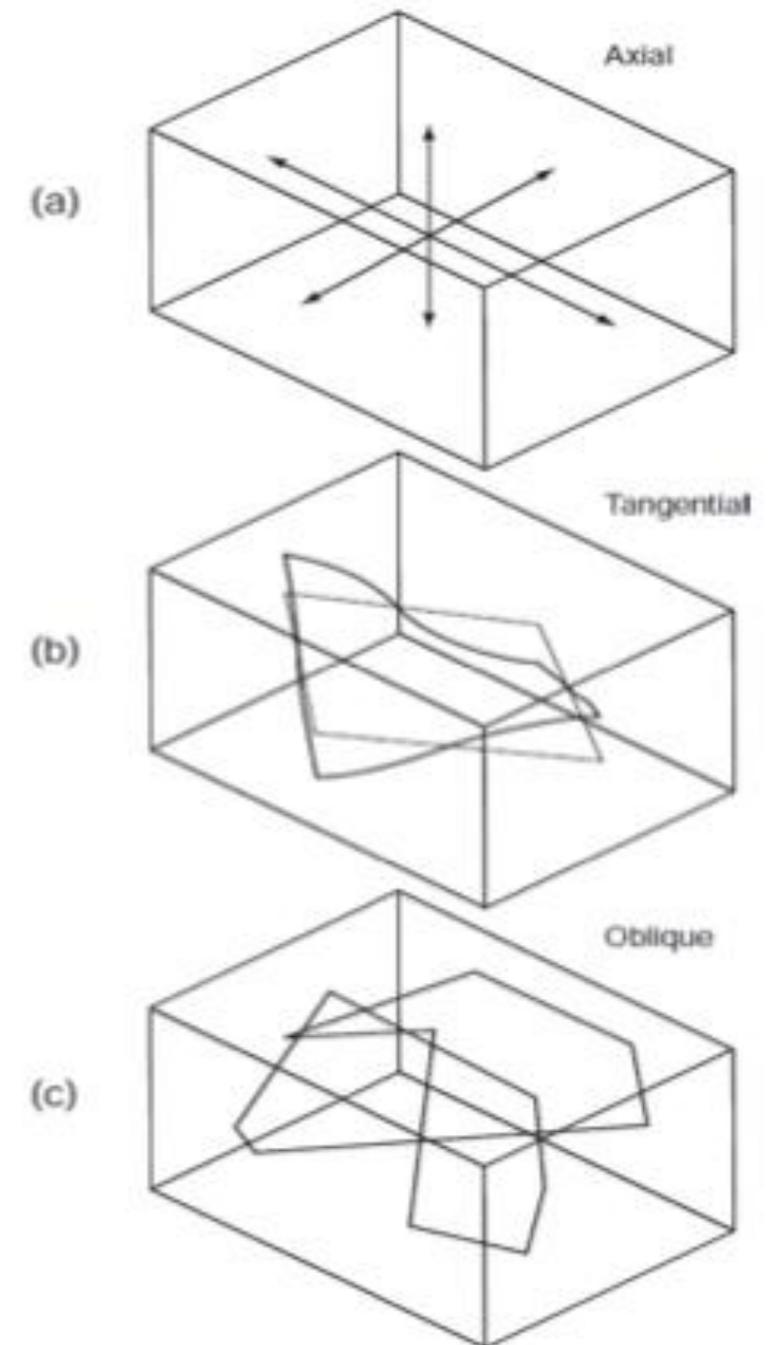
$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{p}{L}\right)^2 + \left(\frac{q}{W}\right)^2 + \left(\frac{r}{H}\right)^2}$$

c	la velocità del suono, 344 m/s
L	la lunghezza del locale in metri
W	la larghezza del locale in metri
H	l'altezza del locale in metri
p, q, r	gli interi 0,1,2,3... n



Analisi Modale

Si calcolano le frequenze modali basandosi sulle dimensioni delle pareti rigide del locale
Uso di un programma di calcolo che sostituisca valori crescenti agli indici p, q, r , in sequenza
ordini i risultati dalla frequenza più piccola alla più grande
numeri i modi e ne descriva il tipo contando il numero di zeri presenti negli indici p, q, r



Calcolo delle Risonanze Modali in stanze rettangolari

DIMENSIONI DEL LOCALE IN METRI

Lunghezza : 9.1

Larghezza : 7.6

Altezza : 5.9

=====> Volume 408.04 [m^3]

Proporzioni 1:1.29:1.54

Indici Modali da valutare: 0..4

=====> Modi : 125

Modo	Frequenza	Angoli xyz	Rifl.	p	q	r	Tipo
1	18.901	0.0 90.0 90.0	90.0	1	0	0	A
2	22.632	90.0 0.0 90.0	90.0	0	1	0	A
3	29.153	90.0 90.0 0.0	0.0	0	0	1	A
4	29.486	50.1 39.9 90.0	90.0	1	1	0	T
5	34.744	57.0 90.0 33.0	33.0	1	0	1	T
6	36.906	90.0 52.2 37.8	37.8	0	1	1	T
7	37.802	0.0 90.0 90.0	90.0	2	0	0	A
8	41.465	62.9 56.9 45.3	45.3	1	1	1	O
9	44.059	30.9 59.1 90.0	90.0	2	1	0	T
10	45.263	90.0 0.0 90.0	90.0	0	2	0	A
11	47.738	37.6 90.0 52.4	52.4	2	0	1	T
12	49.051	67.3 22.7 90.0	90.0	1	2	0	T
13	52.831	44.3 64.6 56.5	56.5	2	1	1	O
14	53.839	90.0 32.8 57.2	57.2	0	2	1	T
15	56.703	0.0 90.0 90.0	90.0	3	0	0	A
16	57.060	70.7 37.5 59.3	59.3	1	2	1	O
17	58.305	90.0 90.0 0.0	0.0	0	0	2	A
18	58.973	50.1 39.9 90.0	90.0	2	2	0	T
19	61.053	21.8 68.2 90.0	90.0	3	1	0	T
20	61.292	72.0 90.0 18.0	18.0	1	0	2	T
21	62.543	90.0 68.8 21.2	21.2	0	1	2	T
22	63.758	27.2 90.0 62.8	62.8	3	0	1	T
23	65.337	73.2 69.7 26.8	26.8	1	1	2	O
24	65.785	54.9 46.5 63.7	63.7	2	2	1	O
25	67.656	33.1 70.5 64.5	64.5	3	1	1	O
26	67.895	90.0 0.0 90.0	90.0	0	3	0	A

Modo	Frequenza	Angoli xyz	Rifl.	p	q	r	Tipo
27	69.487	57.0 90.0 33.0	33.0	2	0	2	T
28	70.477	74.4 15.6 90.0	90.0	1	3	0	T
29	72.554	38.6 51.4 90.0	90.0	3	2	0	T
30	73.080	58.9 72.0 37.1	37.1	2	1	2	O
31	73.812	90.0 52.2 37.8	37.8	0	2	2	T
32	73.889	90.0 23.2 66.8	66.8	0	3	1	T
33	75.604	0.0 90.0 90.0	90.0	4	0	0	A
34	76.194	75.6 53.6 40.1	40.1	1	2	2	O
35	76.268	75.7 27.1 67.5	67.5	1	3	1	O
36	77.709	60.9 29.1 90.0	90.0	2	3	0	T
37	78.191	43.5 54.6 68.1	68.1	3	2	1	O
38	78.919	16.7 73.3 90.0	90.0	4	1	0	T
39	81.030	21.1 90.0 68.9	68.9	4	0	1	T
40	81.331	45.8 90.0 44.2	44.2	3	0	2	T
41	82.929	62.9 56.9 45.3	45.3	2	2	2	O
42	82.997	62.9 35.1 69.4	69.4	2	3	1	O
43	84.131	26.0 74.4 69.7	69.7	4	1	1	O
44	84.421	47.8 74.5 46.3	46.3	3	1	2	O
45	87.458	90.0 90.0 0.0	0.0	0	0	3	A
46	88.118	30.9 59.1 90.0	90.0	4	2	0	T
47	88.459	50.1 39.9 90.0	90.0	3	3	0	T
48	89.477	77.8 90.0 12.2	12.2	1	0	3	T
49	89.494	90.0 40.7 49.3	49.3	0	3	2	T
50	90.338	90.0 75.5 14.5	14.5	0	1	3	T
51	90.526	90.0 0.0 90.0	90.0	0	4	0	A
52	91.468	78.1 42.1 50.4	50.4	1	3	2	O
53	92.295	78.2 75.8 18.6	18.6	1	1	3	O
54	92.478	78.2 11.8 90.0	90.0	1	4	0	T
55	92.815	35.5 60.8 71.7	71.7	4	2	1	O
56	93.078	52.5 60.9 51.2	51.2	3	2	2	O
57	93.139	52.5 43.2 71.8	71.8	3	3	1	O
58	95.105	90.0 17.9 72.1	72.1	0	4	1	T
59	95.278	66.6 90.0 23.4	23.4	2	0	3	T
60	95.475	37.6 90.0 52.4	52.4	4	0	2	T
61	96.965	78.8 21.0 72.5	72.5	1	4	1	O
62	97.150	67.1 45.7 53.1	53.1	2	3	2	O
63	97.929	67.3 76.6 26.7	26.7	2	1	3	O
64	98.102	67.3 22.7 90.0	90.0	2	4	0	T
65	98.121	39.6 76.7 53.5	53.5	4	1	2	O
66	98.476	90.0 62.6 27.4	27.4	0	2	3	T
67	100.274	79.1 63.2 29.3	29.3	1	2	3	O
68	101.616	41.9 48.1 90.0	90.0	4	3	0	T
69	102.342	68.3 27.8 73.4	73.4	2	4	1	O
70	104.231	57.0 90.0 33.0	33.0	3	0	3	T
71	105.483	69.0 64.6 34.0	34.0	2	2	3	O
72	105.661	44.3 64.6 56.5	56.5	4	2	2	O



Plot del numero dei modi nelle diverse bande di frequenza

Banda [Hz]	Modi
10... 13	0
13... 16	0
16... 20	1 *
20... 25	1 *
25... 32	2 **
32... 40	3 ***
40... 50	5 *****
50... 63	9 *********
63... 80	17 *****
80... 100	28 *****
100... 125	32 *****
125... 160	25 *****
160... 200	1 *

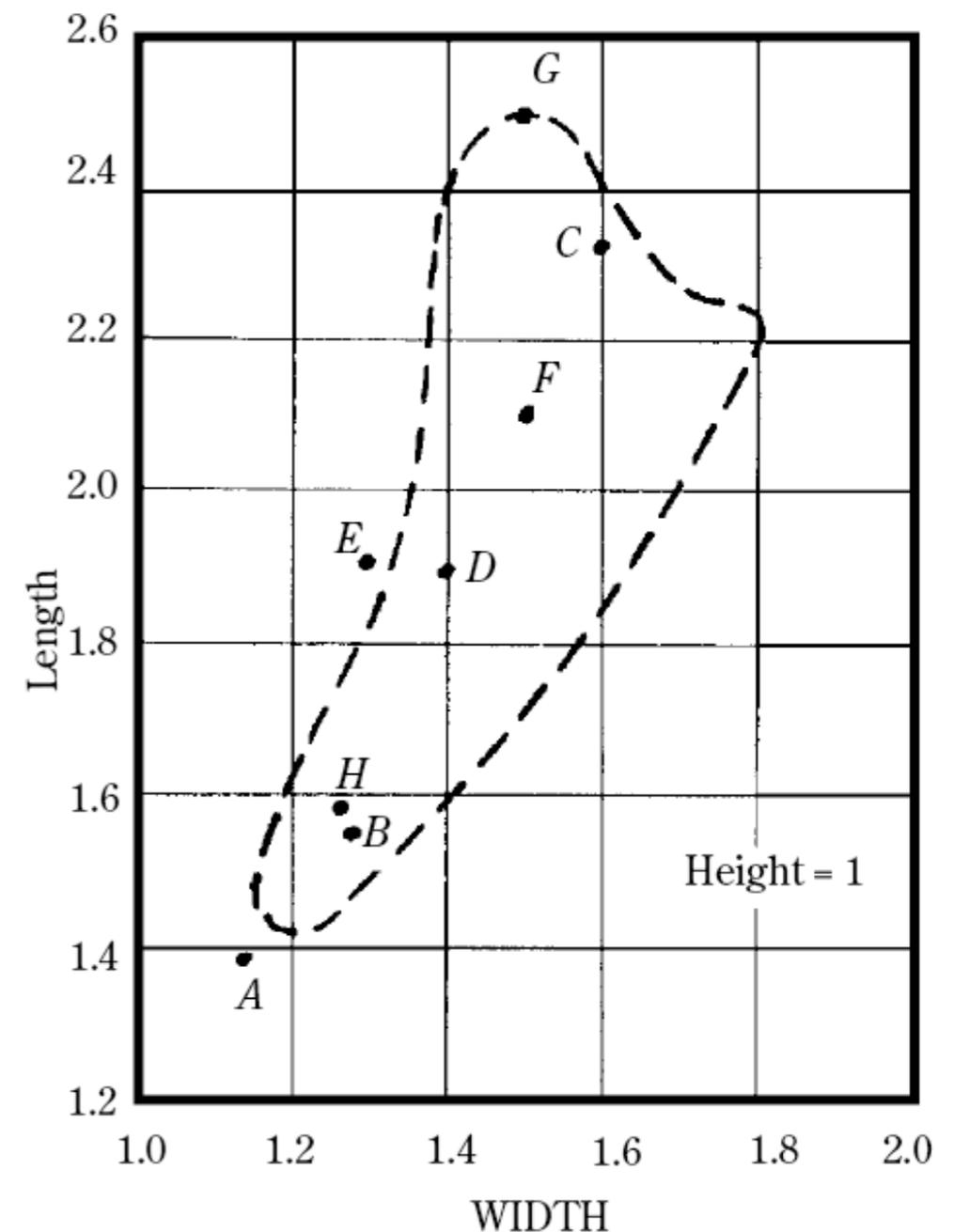
Lo step successivo è quello di studiare le dimensioni degli ambienti sulla base della distribuzione modale e quindi trovare le proporzioni migliori e degli standards



Proporzioni per locali rettangolari

	Altezza	Larghezza	Lunghezza
A	1.00	1.14	1.39
B	1.00	1.29	1.54
C	1.00	1.60	2.33

Area di Bolt



Modi per locali non rettangolari

Alle frequenze superiori, la densità modale è così elevata che le variazioni di pressione sonora rispetto ad un locale rettangolare sono piccole. L'unico vantaggio conseguito è l'eliminazione delle fluttuazioni sonore dovute ad effetti di eco.

Un locale non rettangolare non dà una distribuzione modale più regolare di quella fornita da un locale rettangolare che rispetti le proporzioni ottimali. (Ma solitamente non è così facile rispettarle...)

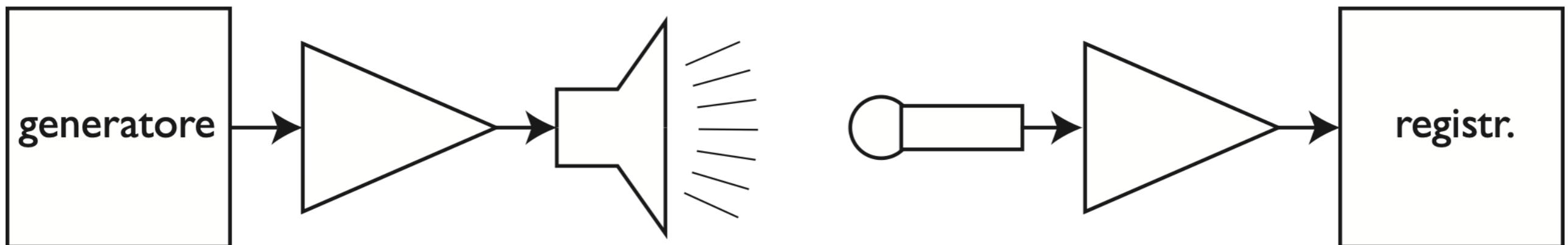
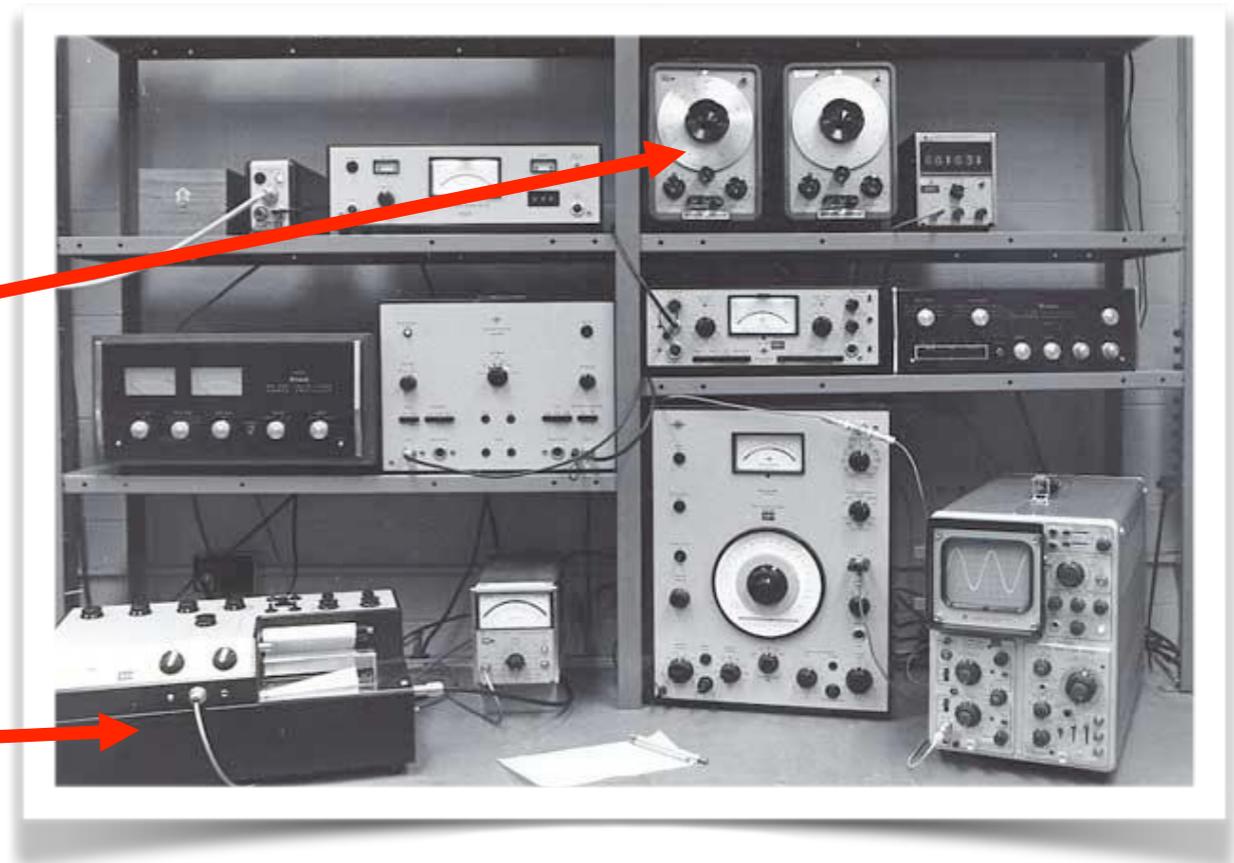


2.0 Metodi di misura

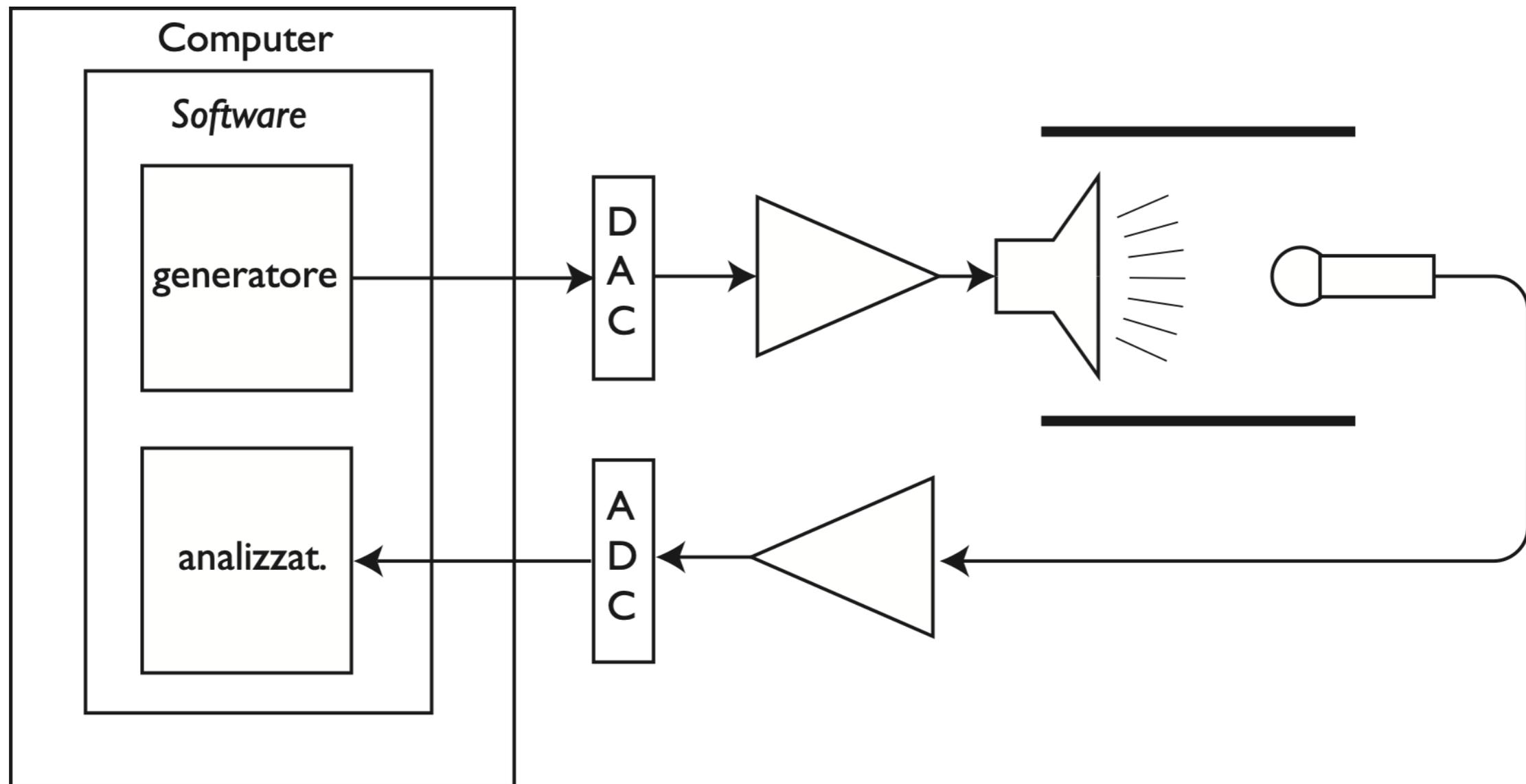


Strumentazione

Prima dell'avvento della tecnologia digitale si usavano generatori di segnali analogici e le misure erano visualizzate su registratori a carta



Attualmente i segnali sono generati e analizzati nel dominio digitale, da opportuni *software* installati sul computer che controlla la misura.



Decadimento del suono stazionario interrotto

Si misura il decadimento sonoro dopo l'interruzione di un suono continuo prolungato.

I segnali di test vengono emessi tipicamente a 90 dB sonori e spesso il rumore di fondo raggiunge livelli di circa 20 ÷ 30 dB quindi risulta difficile stimare un decadimento di 60 dB per misurare l'RT60.

NORME ISO: RT60 è definito come due volte il tempo misurato in un decadimento da -5 a -35 dB sotto il valore iniziale del livello sonoro.

dato che le curve di decadimento spesso presentano doppie pendenze o curvature non trascurabili, questa definizione operativa non corrisponde con quella di Sabine.



Misura dell'RT60 a diverse frequenze

due metodi di misura:

1. **zona per zona**, usando segnali con contributi solo su una fascia ristretta di frequenze
2. in un'**unica operazione**, usando segnali a larga banda ed analizzando spettralmente il segnale acquisito

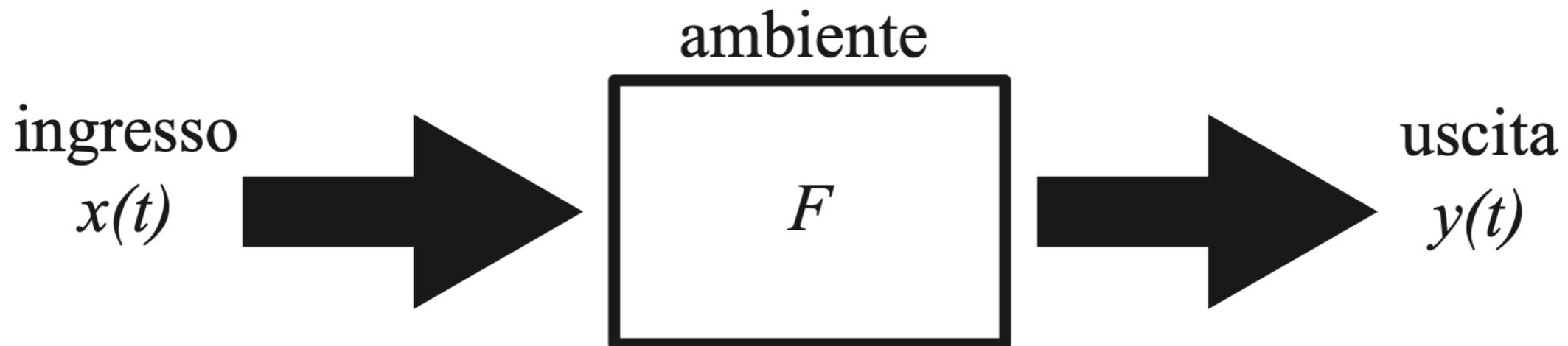
il secondo metodo è molto più veloce ma la potenza viene dispersa su tutte le frequenze ed il rapporto segnale rumore si riduce



Tecniche impulsive

Si possono calcolare l'RT60 e tutti gli altri parametri se si è determinata direttamente o indirettamente la risposta dell'ambiente a un suono impulsivo.

Schematizzazione ambiente acustico come “scatola nera” la cui risposta è lineare e invariante nel tempo:



Risposta all'impulso

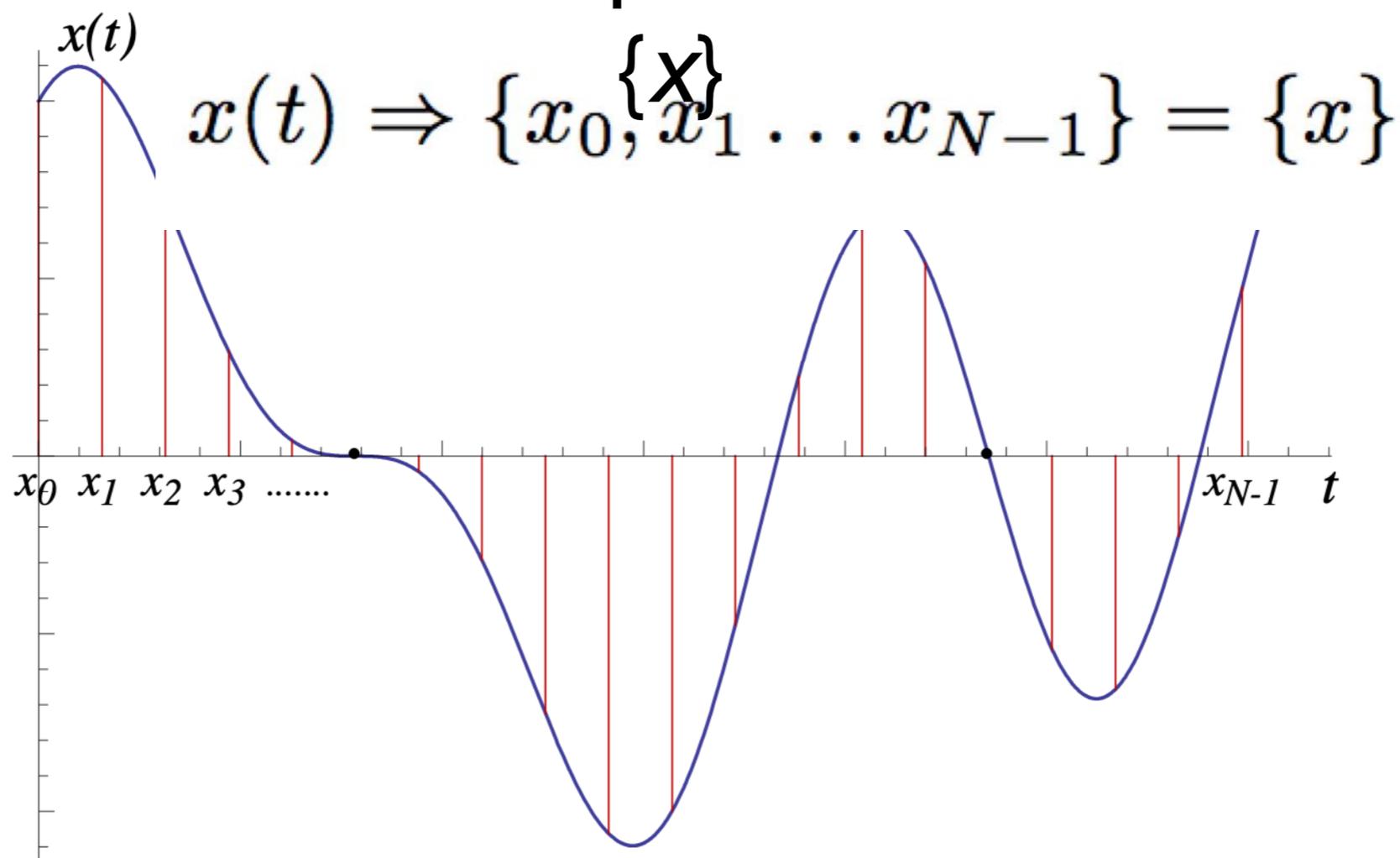
Per un sistema lineare e tempo-invariante la risposta $y(t)$ a un segnale qualsiasi $x(t)$ si può calcolare se si conosce la risposta $h(t)$ a un segnale impulsivo (Delta di Dirac) come convoluzione fra $x(t)$ e $h(t)$

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) h(t - \tau) d\tau = x(t) * h(t)$$



Dominio discreto

Passando al dominio discreto, al posto di un segnale continuo $x(t)$ avremo una sequenza di valori campionati



Nel dominio discreto si può esprimere la risposta $\{y\}$ a un segnale $\{x\}$ tramite la convoluzione digitale con la risposta all'impulso $\{h\}$

$$\{y\} = \{x\} * \{h\} = \{y\} : y_i = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_k h_{i-k}$$

dove si intendono le sequenze estese in entrambe le direzioni con valori nulli.

Un caso particolare si ha quando il segnale si ripete periodicamente con periodo N (o lo si estende idealmente in modo da considerarlo periodico) e la risposta all'impulso ha lunghezza $< N$. In questo caso

$$\{y\} = \{x\} * \{h\} = \{x\} \hat{*} \{h\} : y_i = \sum_{k=0}^{N-1} x_k h_{\eta(i-k)}$$

dove l'operatore $\hat{*}$ rappresenta la convoluzione ciclica e

$$\eta(i-k) \hat{*} = \begin{cases} i-k & \text{se } i-k \geq 0 \\ N+i-k & \text{se } i-k < 0 \end{cases}$$

Nelle stesse condizioni si definisce anche la correlazione ciclica:

$$\{y\} = \{f\} \hat{\circ} \{g\} : y_i = \sum_{k=0}^{N-1} f_k g_{\eta(i+k)}$$

Da un punto di vista teorico,
misurando la risposta $\{h\}$ del
sistema a un impulso $\{\delta\}$
avremmo le informazioni
necessarie a
calcolare qualsiasi parametro
fisico



Nel dominio digitale la determinazione della risposta all'impulso è particolarmente semplice

Il segnale in ingresso, quello in uscita e la risposta all'impulso sono legate tra loro:

$$\{y\} = \{x\} * \{h\} \quad \text{convoluzione digitale}$$

Conoscendo il segnale di ingresso (e la sua inversa) e misurando quello di uscita di un sistema si può determinare la sua IR:

$$\{y\} * \{x^{-1}\} = \{h\} * \{x\} * \{x^{-1}\} = \{h\} * \{\delta\} = \{h\}$$

Basta quindi immettere come segnale di test $\{x\} = \{\delta\}$ e registrare il segnale di uscita:

$$y_0 = 1 \cdot h_0 + 0 \cdot h_1 + 0 \cdot h_2 + \dots = h_0$$

$$y_1 = 0 \cdot h_0 + 1 \cdot h_1 + 0 \cdot h_2 + \dots = h_1$$

$$y_2 = 0 \cdot h_0 + 0 \cdot h_1 + 1 \cdot h_2 + \dots = h_2$$

...



Perché non usare quindi sempre un $\{\delta\}$?

Il problema è legato all'impossibilità, per qualsiasi genere di altoparlante, di riprodurre un segnale impulsivo brevissimo e sufficientemente intenso senza considerevoli distorsioni in frequenza e fase.

Si introducono quindi varie tecniche che sfruttano sequenze continue e differenti algoritmi per ottenere l'IR:

Rumore bianco: segnale casuale con spettro piatto su tutto l'intervallo di frequenze considerato (20 ÷ 20000 Hz).

Rumore rosa: segnale casuale con stessa energia per ogni ottava, quindi con spettro piatto su tutto l'intervallo di frequenze considerato (20 ÷ 20000 Hz) in scala logaritmica. Le componenti a bassa frequenza hanno potenza

maggiore.
Sequenze MLS
Sine-sweep



Deconvoluzione tramite DFT

Si passa dal dominio del tempo a quello delle frequenze usando la **trasformata di Fourier** e il **teorema della convoluzione**

$$\mathcal{DF} [\{y\}] = \{Y\} = \mathcal{DF} [\{x\} \hat{*} \{h\}] = \{X\} \{H\}$$

$$\mathcal{DF}^{-1} [\{H\}] = \mathcal{DF}^{-1} \left[\frac{\{Y\}}{\{X\}} \right] = \{h\}$$

$\{H\}$ funzione di trasferimento

$\{h\}$ risposta all'impulso IR

Misura dell'IR con sequenze MLS

(Maximum Length Sequence)

Segnale pseudo-casuale

Proprietà del segnale MLS: tramite la correlazione ciclica con se stesso si produce la sequenza $\{\delta\}$.

Utilizzando una sequenza MLS in ingresso, caricando l'uscita ed effettuando una correlazione circolare tra i due, si ottiene l'IR:

$$\text{se } \{y\} = \{h\} \hat{*} \{x\} \quad \text{e} \quad \frac{1}{N} \{x\} \hat{\circ} \{x\} = \{\delta\}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{N} \{y\} \hat{\circ} \{x\} = \{h\} \hat{*} \left[\frac{1}{N} \{x\} \hat{\circ} \{x\} \right] = \{h\} \hat{*} \{\delta\} = \{h\}$$

il segnale deve essere più lungo dell'IR ed emesso almeno 2 volte per raggiungere la situazione di regime

PRO dell'MLS

Si può calcolare la correlazione circolare con la trasformata veloce di Hadamard (FHT).

MLS è un segnale deterministico: ripetendo la misura ed effettuando una serie di medie del segnale in uscita si fa aumentare il rapporto segnale-rumore di 3 dB ogni volta che si raddoppia il numero di medie.

CONTRO dell'MLS

Dipendenza dalla non linearità del sistema. Se il sistema non è perfettamente lineare appaiono “artefatti” sistemati che non possono essere diminuiti neanche mediando più misure.

Se le sequenze sono più lunghe si aumenta il rapporto s/r , ma se sono troppo lunghe gli effetti dovuti ad una non perfetta tempo-invarianza diventano predominanti.



PRO del sine-sweep

Il segnale inverso dello sweep è proprio esso stesso invertito sull'asse dei tempi. Quindi con il segnale invertito e il segnale di uscita sarà possibile calcolare l'IR con un'operazione di deconvoluzione.

La risposta ad un singolo *sweep* non ripetuto è pressoché uguale a quella che si ha con una ripetizione periodica: non è necessario emettere il segnale di test 2 volte. Si dimezzano i tempi di misura. Ottimo rapporto s/r (circa 20 dB meglio dell'MLS).

Il *sine-sweep* è molto meno soggetto ad artefatti causati dalla non perfetta linearità e tempo-invarianza del sistema



CONTRO del sine-sweep

maggior complessità dell'algoritmo di analisi,
richiede maggior potenza di calcolo rispetto
alle altre tecniche.



IR e RT60

I tempi di riverberazione misurati direttamente dal decadimento della risposta all'impulso sono leggermente inferiori a quelli prodotti dal decadimento da rumore stazionario e non coincidono con la definizione data da Sabine.

Con l'emissione di un suono impulsivo non si raggiunge la densità di energia sonora di regime in tutto l'ambiente.

La legge di decadimento riverberante è ricostruibile attraverso un integrale della risposta al

Integrale di Schroeder
$$S(t) = \int_t^{\infty} h^2(t) dt$$

che corrisponde all'energia che rimane nell'IR al tempo t.

Mettendo in grafico il rapporto espresso in dB tra l'integrale di Schroeder e il massimo valore misurato al t = 0 si deriva una curva di decadimento analoga a quella che si ottiene con il decadimento del rumore stazionario interrotto.



Parametri di intelligibilità: C50 e STI

Le caratteristiche interne di un ambiente, soprattutto quando sia essenziale garantire una buona intelligibilità del parlato, possono essere ben descritte attraverso i parametri C50 (*chiarezza*) e STI (*Speech Transmission Index*).

	C50 dB	STI
Ambienti adibiti al parlato	≥ 0	$\geq 0,6$
Ambienti adibiti ad attività sportive	≥ -2	$\geq 0,5$

Tempo di Riverberazione

Nella pratica corrente è molto diffuso, per quanto generalmente meno affidabile, l'utilizzo del tempo di riverberazione T per valutare le caratteristiche acustiche interne di un ambiente.

I valori ottimali del tempo di riverberazione medio fra 500 Hz e 1000 Hz sono ricavabili dalle espressioni seguenti:

$$T_{\text{ott}} = 0,32 \log(V) + 0,03 \quad [\text{s}] \quad (\text{ambiente non occupato adibito al parlato})$$

$$T_{\text{ott}} = 1,27 \log(V) - 2,49 \quad [\text{s}] \quad (\text{ambiente non occupato adibito ad attività sportive})$$

dove V è il volume dell'ambiente [m^3]

* si suggerisce che i risultati ottenuti dalle misurazioni di tempo di riverberazione T ad ambiente non occupato, rispettino il seguente criterio, in tutte le bande di ottava comprese fra 250 Hz e 4000 Hz: $T \leq 1,2 T_{\text{ott}}$

* per quanto riguarda la determinazione del tempo di riverberazione consenta di valutare un ambiente dedicato al parlato, tuttavia per una completa caratterizzazione acustica di un ambiente avente tale utilizzo è consigliabile la rilevazione di altri parametri acustici (come il C50 e lo STI). A maggior ragione il tempo di riverberazione non è adeguato per valutare ambienti utilizzati per l'ascolto della musica (teatri, cinema, etc).

Espressione grafica del Tempo di Riverberazione Ottimale

C.1 Valori ottimali del tempo di riverberazione medio tra 500 Hz e 1 000 Hz, T_{ott} , in ambienti adibiti al parlato e ad attività sportiva

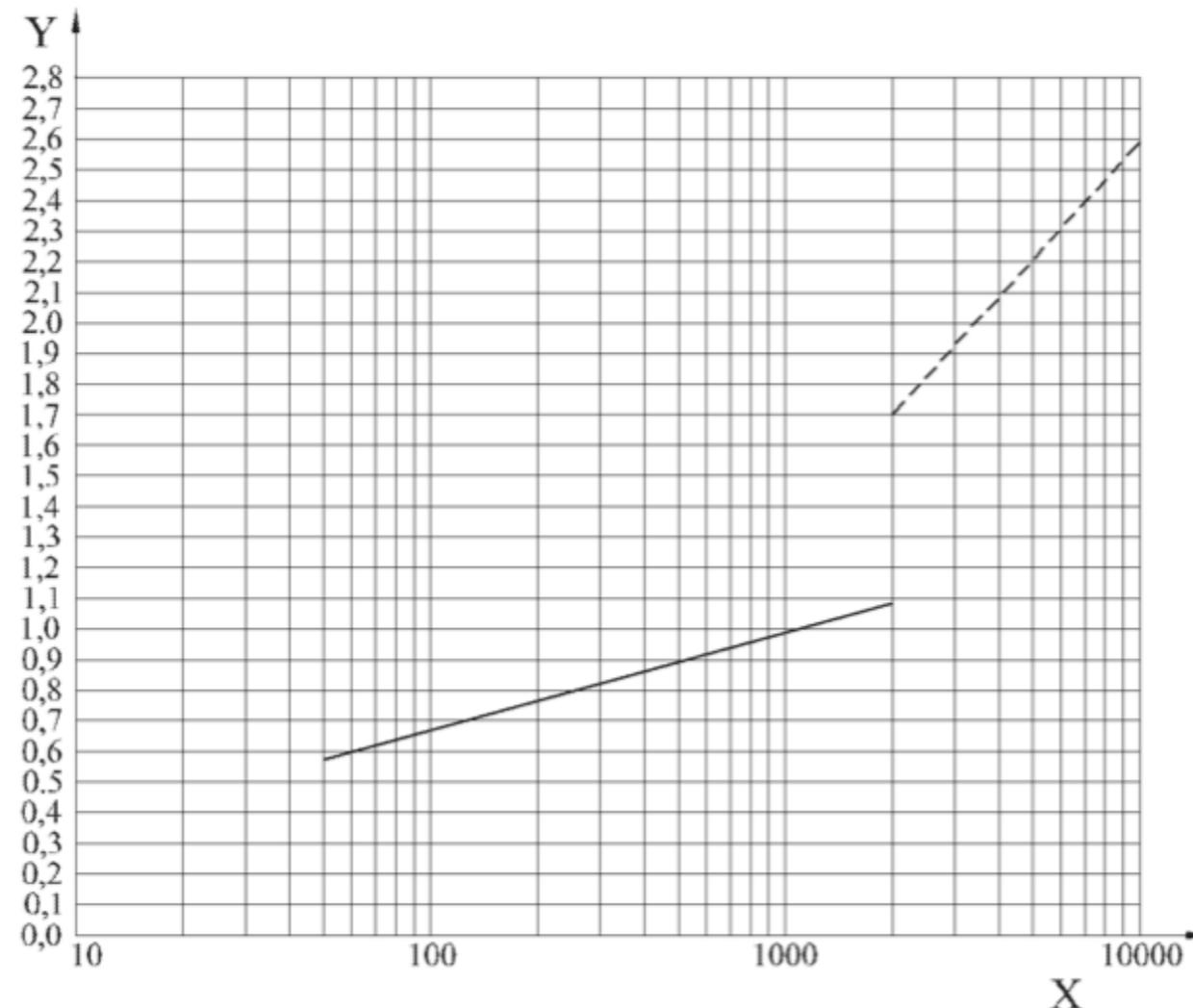
Legenda

—— Parlato (ambiente non occupato)

----- Sport (ambiente non occupato)

X Volume V , m^3

Y Tempo di riverberazione ottimale, T_{ott} , s



Norma Uni 11532:2014

STUDIO SOUND SERVICE SAS DI DONATO MASCI E C.
UNIstore - 2017 - 362365

A.2 Valori di riferimento

prospetto A.1 Valori di riferimento per il settore scolastico

Destinazione ambiente	Descrittore ^{a)}	Valore di riferimento ^{b)}	Intervallo di frequenza (Hz)	Riferimento normativo ^{c)}	Note ^{d)}	
AULE DIDATTICHE e affini						
Aule didattiche di ogni ordine e grado	T	≤0,6 s a 0,8 s	1)	Da 500 a 2 000	UK	8) 9)
	T	≤1,2 s	-	Da 500 a 2 000	IT	8) 9)
	T	≤0,6 s	3) 40% - 125 Hz	Da 125 a 2 000	NO 6)	8) 9)
	T	≤0,6 s a 0,7 s	2)	Da 500 a 2 000	USA	8) 9) 11) < 566 m ³
	T	≤0,6 s a 0,8 s	3) 50% - 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	FI 6)	8)
	T	≤0,5 s	3) 20% - 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	SE 6)	8) 9)
	T	≤0,4 s a 0,8 s	1)	Da 500 a 2 000	FR	7) 8) 9)
	T	≤0,6 s	3) 20% - 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	DK-1 6)	8)
	T	≤0,6 s	-	-	OMS	13)
Open space	T	≤0,4 s	5)	Da 250 a 2 000	NO 6)	8) 9) 11) < 1500 m ³
(in scuole secondarie)	T	≤0,6 s	3) 15% - 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	SE 6)	8) 9)
(in scuole primarie o per l'infanzia)	T	≤0,4 s	3) 20% - 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	DK-1 6)	8)
(doposcuola)	T	≤0,6 s	3) 40% - 125 Hz	Da 125 a 2 000	NO 6)	8) 9)
(doposcuola)	T	≤0,5 s	3) 20% - 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	SE 6)	8) 9)
Aule per bambini con deficit uditivo	T	≤0,4 s	1)	Da 500 a 2 000	UK	8) 9)



Norma Uni 11532:2014

Aule di Musica	<i>T</i>	≤1,0 s	-	Da 500 a 2 000	UK	8) 9)
	<i>T</i>	≤0,4 s a 0,8 s	1)	Da 500 a 2 000	FR	7) 8) 9)
	<i>T</i>	≤0,6 s	4) 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	SE 6)	8) 9)
<i>(doposcuola)</i>	<i>T</i>	≤0,6 s	4) 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	SE 6)	8) 9)
<i>(in acustico)</i>	<i>T</i>	<1,0 s	3) 50% - 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	FI 6)	8)
<i>(in acustico)</i>	<i>T</i>	≤1,1 s	3) 20% - 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	DK-1 6)	8)
<i>(in elettrico)</i>	<i>T</i>	<0,9 s	3) 50% - 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	FI 6)	8)
<i>(in elettrico)</i>	<i>T</i>	≤0,6 s	3) 20% - 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	DK-1 6)	8)
<i>(in scuole secondarie)</i>	<i>T</i>	≤0,8 s	4) 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	SE 6)	8) 9)
<i>(in scuole primarie o per l'infanzia)</i>	<i>T</i>	≤0,8 s a 1,0 s	3) 50% - 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	FI 6)	8)
Biblioteca	<i>T</i>	≤0,8 s a 1,0 s	1)	Da 500 a 2 000	UK	8) 9)
	<i>T</i>	≤0,4 s a 0,8 s	1)	Da 500 a 2 000	FR	7) 8) 9)
	<i>T</i>	≤0,6 s	4) 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	SE 6)	8) 9)
<i>(in scuole secondarie)</i>	<i>T</i>	≤0,6 s	4) 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	SE 6)	8) 9)
Laboratori scolastici	<i>T</i>	≤0,8 s	1)	Da 500 a 2 000	UK	8) 9)
	<i>T</i>	≤0,6 s	3) 20% - 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	DK-1 6)	8)
	<i>T</i>	≤0,6 s	3) 40% - 125 Hz	Da 125 a 4 000	NO 6)	8) 9)
<i>(in scuole secondarie)</i>	<i>T</i>	≤0,5 s	4) 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	SE 6)	8) 9)
Ambito scolastico senza particolare destinazione d'uso	<i>T</i>	≤0,4 s	3) 25% - 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	SE 6)	8) 9)
Aula informatica	<i>T</i>	≤0,6 s	4) 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	SE 6)	8) 9)
<i>(in scuole secondarie)</i>	<i>T</i>	≤0,6 s	4) 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	SE 6)	8) 9)

Norma Uni 11532:2014

prospetto A.1 Valori di riferimento per il settore scolastico (Continua)

Destinazione ambiente	Descrittore ^{a)}	Valore di riferimento ^{b)}		Intervallo di frequenza (Hz)	Riferimento normativo ^{c)}	Note ^{d)}	
Aula insegnanti	<i>T</i>	≤1,0 s	1)	Da 500 a 2 000	UK	8) 9)	
	<i>T</i>	≤0,4 s	3) 20% - 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	DK-1 6)	8)	
	<i>T</i>	≤0,9 s	3) 20% - 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	DK-1 6)	8)	
	<i>T</i>	<0,6 s	3) 50% - 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	FI 6)	8)	
	<i>T</i>	≤0,6 s	4) 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	SE 6)	8) 9)	
(in scuole secondarie)	<i>T</i>	≤0,6 s	4) 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	SE 6)	8) 9)	
Sale comuni	<i>T</i>	≤0,9 s	3) 40% - 125 Hz	Da 125 a 2 000	NO 6)	8) 9)	
	<i>T</i>	≤0,5 s	4) 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	SE 6)	8) 9)	
	(doposcuola)	<i>T</i>	≤0,5 s	4) 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	SE 6)	8) 9)
	(sala gioco per doposcuola)	<i>T</i>	≤0,5 s	4) 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	SE 6)	8) 9)
Uffici	<i>T</i>	≤0,6 s	4) 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	SE 6)	8) 9)	
	(in scuole secondarie)	<i>T</i>	≤0,6 s	4) 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	SE 6)	8) 9)
LOCALI COMUNI							
Refettorio	<i>T</i>	≤1,0 s	1)	Da 500 a 2 000	UK	8) 9)	
	<i>T</i>	≤0,5 s	4) 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	SE 6)	8) 9)	
	(doposcuola)	<i>T</i>	≤0,5 s	4) 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	SE 6)	8) 9)
	(in scuole secondarie)	<i>T</i>	≤0,5 s	4) 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	SE 6)	8) 9)
	(in scuole secondarie, S > 100 m ²)	<i>T</i>	≤0,6 s	4) 125 Hz 5)	Da 125 a 4 000	SE 6)	8) 9)

Norma Uni 11532:2014

Aula Magna/Auditorium	T	$\leq 0,6 \text{ s a } 0,9 \text{ s}$	³⁾ 50% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	FI ⁶⁾	⁸⁾
(in scuole secondarie)	T	$\leq 0,6 \text{ s}$	³⁾ 15% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾	^{8) 9)}
Palestra scolastica	T	$\leq 1,5 \text{ s}$	¹⁾	Da 500 a 2 000	UK	^{8) 9)}
	T	$0,95 \times \text{Log}(V) - 1,74 \text{ s}$		Da 500 a 1 000	DE	^{9) 11)} $< 8500 \text{ m}^3$ ¹²⁾ $> 2000 \text{ m}^3$
	T	$1,27 \times \text{Log}(V) - 2,49 \text{ s}$		Da 500 a 1 000	DE	^{9) 11)} $< 8500 \text{ m}^3$ ¹²⁾ $> 2000 \text{ m}^3$
	T	$\leq 2,2 \text{ s}$		Da 250 a 2 000	IT	^{8) 9)}
	T	$\leq 1,5 \text{ s}$	⁵⁾	Da 250 a 2 000	NO ⁶⁾	^{8) 9)} ¹¹⁾ $\leq 6 000 \text{ m}^3$
(h < 5 m) (in scuole secondarie) (in scuole primarie o per l'infanzia) (doposcuola)	T	$\leq 1,6 \text{ s}$	³⁾ 20% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	DK-1 ⁶⁾	⁸⁾ ¹¹⁾ $\leq 3 500 \text{ m}^3$
	T	$\leq 1,2 \text{ s}$	⁴⁾ 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾	^{8) 9)}
	T	$\leq 1,8 \text{ s}$	³⁾ 20% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	DK-1 ⁶⁾	⁸⁾ ¹²⁾ $> 3 500 \text{ m}^3$
	T	$\leq 0,6 \text{ s a } 0,9 \text{ s}$	³⁾ 50% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	FI ⁶⁾	⁸⁾
	T	$\leq 1,5 \text{ s}$	⁴⁾ 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾	^{8) 9)}
	T	$\leq 0,8 \text{ s a } 1,0 \text{ s}$	³⁾ 50% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	FI ⁶⁾	⁸⁾
	T	$\leq 1,2 \text{ s}$	⁴⁾ 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾	^{8) 9)}
Piscina scolastica	T	$\leq 2,0 \text{ s}$	³⁾ 20% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	DK-1 ⁶⁾	⁸⁾ ¹¹⁾ $\leq 1 500 \text{ m}^3$
	T	$\leq 2,3 \text{ s}$	³⁾ 20% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	DK-1 ⁶⁾	⁸⁾ ¹²⁾ $> 1 500 \text{ m}^3$
	T	$\leq 2,0 \text{ s}$	⁵⁾	Da 250 a 2 000	NO ⁶⁾	^{8) 9)} ¹¹⁾ $\leq 2 000 \text{ m}^3$

Norma Uni 11532:2014

prospetto A.1 Valori di riferimento per il settore scolastico (Continua)

Destinazione ambiente	Descrittore ^{a)}	Valore di riferimento ^{b)}	Intervallo di frequenza (Hz)	Riferimento normativo ^{c)}	Note ^{d)}	
AMBIENTI DI SERVIZIO						
Corridoio <i>(in scuole secondarie)</i> <i>(in scuole primarie o per l'infanzia)</i>	<i>T</i>	<1,3 s	³⁾ 50% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	FI ⁶⁾	8)
	<i>T</i>	≤0,4 s	³⁾ 20% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	DK-1 ⁶⁾	8)
	<i>T</i>	≤0,9 s	³⁾ 20% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	DK-1 ⁶⁾	8)
	<i>T</i>	≤0,5 s	⁵⁾	Da 250 a 4 000	SE ⁶⁾	8) 9)
	<i>T</i>	≤0,8 s	⁵⁾	Da 250 a 4 000	SE ⁶⁾	8) 9)
	<i>T</i>	<1,1 s	³⁾ 50% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	FI ⁶⁾	8)
Atrio/ Ingresso <i>(in scuole secondarie)</i>	<i>T</i>	≤0,9 s a 1,1 s	³⁾ 50% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	FI ⁶⁾	8)
	<i>T</i>	≤0,4 s	³⁾ 20% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	DK-1 ⁶⁾	8)
	<i>T</i>	≤0,9 s	³⁾ 20% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	DK-1 ⁶⁾	8)
	<i>T</i>	<1,3 s	³⁾ 50% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	FI ⁶⁾	8)
	<i>T</i>	≤0,5 s	⁵⁾	Da 250 a 4 000	SE ⁶⁾	8) 9)
	<i>T</i>	≤1,5 s	⁵⁾	Da 250 a 4 000	SE ⁶⁾	8) 9)
Scale <i>(in scuole primarie o per l'infanzia)</i>	<i>T</i>	≤1,3 s	³⁾ 20% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	DK-1 ⁶⁾	8)
	<i>T</i>	≤1,3 s	³⁾ 40% - 125 Hz	Da 125 a 2 000	NO ⁶⁾	8) 9)
	<i>T</i>	≤0,5 s	⁵⁾	Da 250 a 4 000	SE ⁶⁾	8) 9)
	<i>T</i>	≤0,9 s	⁵⁾	Da 500 a 2 000	NO ⁶⁾	8) 9)

Norma Uni 11532:2014

Note

- a) il descrittore preso in esame può essere il tempo di riverberazione (T), la chiarezza (C_{50}) o l'indice di intelligibilità del parlato (STI);
- b) per ogni valore di riferimento è esplicitato, con note da 1) a 5), in che modo il descrittore è determinato, ovvero con:
- 1) media aritmetica dei valori calcolati per le bande prese in esame,
 - 2) valore limite massimo riscontrabile in ciascuna banda presa in esame,
 - 3) valore limite massimo per cui è tollerato il x% in più in alcune bande, da specificare,
 - 4) valore limite massimo per cui è tollerato 0,2 s in più in alcune bande, da specificare,
 - 5) valore limite massimo per cui è tollerato un margine di 0,1 s per ciascuna banda considerata;
- c) Nei riferimenti normativi è indicata la sigla corrispondente al Paese d'origine, alla quale ci si riferisce:
- | | | |
|------|--------------------------------------|---|
| DE | Germania | DIN 18041, |
| DK-1 | Danimarca ⁶⁾ | SBI anvisning 218:2008 |
| FI | Finlandia ⁶⁾ | SFS E249 |
| FR | Francia | Decreto del 25/04/2003 |
| IT | Italia | Circolare Ministeriale N° 3150 del 22/05/1967 e D.M. del 18/12/1975 |
| NO | Norvegia ⁶⁾ | NS 8175:2008 |
| OMS | Organizzazione Mondiale della Sanità | Pamphlet n. 31 del 2008 |
| SE | Svezia ⁶⁾ | SS 25268:2007 |
| UK | Regno unito | BB 93 |
| USA | Stati Uniti d'America | ANSI S12.60:2002 |
- 6) Gli ambienti sono classificati in quattro categorie in base alla qualità (da A - *eccellente* a D - *appena sufficiente*). Nei prospetti da A.1 a A.4 sono riportati i valori relativi alla classe C, ritenuta il riferimento di media qualità.
- d) Nelle note sono indicate le seguenti precisazioni:
- 7) per edifici di nuova costruzione,
 - 8) ambiente arredato,
 - 9) ambiente non occupato dalle persone (al massimo due sperimentatori per l'esecuzione delle misure),
 - 11) per volumi inferiori a (specificare),
 - 12) per volumi superiori a (specificare),
 - 13) da ridurre ulteriormente se in presenza di deficit uditivo.

Norma Uni 11532:2014

STUDIO SOUND SERVICE SAS DI DONATO MASCI E C.
UNiStore - 2017 - 362365

STUDIO SOUND SERVICE SAS DI DONATO MASCI E C.
UNiStore - 2017 - 362365

prospetto A.2 Valori di riferimento per il settore direzionale, commerciale e sportivo

Destinazione ambiente	Descrittore ^{a)}	Valore di riferimento ^{b)}	Intervallo di frequenza (Hz)	Riferimento normativo ^{c)}	Note ^{d)}	
UFFICI e ambienti collaterali						
Ufficio privato	T	≤0,6 s	⁴⁾ 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾	⁸⁾ ⁹⁾
	T	≤0,8 s	³⁾ 40% - 125 Hz	Da 125 a 2 000	NO ⁶⁾	⁸⁾ ⁹⁾
Open space per meno di 20 persone	T	≤0,5 s	⁴⁾ 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾	⁸⁾ ⁹⁾
Open space per più di 20 persone	T	≤0,4 s	⁴⁾ 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾	⁸⁾ ⁹⁾
Open space (h < 3 m)	T	≤0,45 s	³⁾ 50% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	FI ⁶⁾	⁸⁾
Open space (h > 3 m)	T	≤0,5 s	³⁾ 50% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	FI ⁶⁾	⁸⁾
Sala riunioni	T	≤0,6 s	⁴⁾ 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾	⁸⁾ ⁹⁾
	T	≤0,7 s	³⁾ 50% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	FI ⁶⁾	⁸⁾
	T	≤0,8 s	⁴⁾ 40% - 125 Hz	Da 125 a 4 000	NO ⁶⁾	⁸⁾ ⁹⁾
Sala conferenze	T	≤0,6 s	⁴⁾ 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾	⁸⁾ ⁹⁾
Auditorium	T	≤0,9 s	³⁾ 50% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	FI ⁶⁾	⁸⁾ ¹¹⁾ <200 m ³
Sala comune	T	≤1,0 s	³⁾ 40% - 125 Hz	Da 125 a 4 000	NO ⁶⁾	⁸⁾ ⁹⁾
Riposo	T	≤0,6 s	³⁾ 50% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	FI ⁶⁾	⁸⁾
Mensa aziendale	T	≤0,9 s	³⁾ 50% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	FI ⁶⁾	⁸⁾
Mensa aziendale maggiore di 100 m ³	T	≤0,6 s	⁴⁾ 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾	⁸⁾ ⁹⁾
Ingresso	T	≤1,3 s	³⁾ 50% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	FI ⁶⁾	⁸⁾
Segreteria	T	≤0,6 s	⁴⁾ 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾	⁸⁾ ⁹⁾
Corridoio	T	≤0,8 s	⁴⁾ 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾	⁸⁾ ⁹⁾
	T	≤1,0 s	³⁾ 50% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	FI ⁶⁾	⁸⁾
Scale	T	-	⁵⁾	Da 250 a 4 000	SE ⁶⁾	⁸⁾ ⁹⁾
	T	≤1,3 s	⁵⁾	Da 500 a 2 000	NO ⁶⁾	⁸⁾ ⁹⁾
HOTEL e affini						
Stanze	T	≤0,8 s	⁴⁾ 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾	⁸⁾ ⁹⁾
Sala conferenze	T	≤0,6 s	⁴⁾ 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾	⁸⁾ ⁹⁾
Ristorante	T	≤0,6 s	⁴⁾ 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾	⁸⁾ ⁹⁾
Accettazione	T	≤0,6 s	⁴⁾ 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾	⁸⁾ ⁹⁾
Ingresso/Atrio	T	≤0,8 s	⁵⁾	Da 250 a 4 000	SE ⁶⁾	⁸⁾ ⁹⁾
	T	≤1,3 s	⁵⁾	Da 500 a 2 000	NO ⁶⁾	⁸⁾ ⁹⁾
Corridoio	T	≤0,8 s	⁵⁾	Da 250 a 4 000	SE ⁶⁾	⁸⁾ ⁹⁾
	T	≤1,3 s	⁵⁾	Da 500 a 2 000	NO ⁶⁾	⁸⁾ ⁹⁾
Scale	T	≤1,5 s	⁵⁾	Da 250 a 4 000	SE ⁶⁾	⁸⁾ ⁹⁾
	T	≤1,3 s	⁵⁾	Da 500 a 2 000	NO ⁶⁾	⁸⁾ ⁹⁾

prospetto A.2 Valori di riferimento per il settore direzionale, commerciale e sportivo (Continua)

Destinazione ambiente	Descrittore ^{a)}	Valore di riferimento ^{b)}	Intervallo di frequenza (Hz)	Riferimento normativo ^{c)}	Note ^{d)}	
AMBIENTI SPORTIVI						
PALESTRA	C ₅₀	≥ -2 dB	-	DE	¹⁰⁾	
	STI	≥0,50	-	DE	¹⁰⁾	
PISCINE	T	≤2,0 s	-	DK-2	⁹⁾ ¹¹⁾ ≤1 500 m ³	
	T	≤2,3 s	-		⁹⁾ ¹²⁾ >1500 m ³	
	T	≤1,0 s a 1,5 s	³⁾ 125 Hz	Da 125 a 4 000	SE	-
	T	≤2,0 s	¹⁾	Da 500 a 2 000	UK	⁸⁾ ⁹⁾
<p>Note</p> <p>a) il descrittore preso in esame può essere il tempo di riverberazione (T), la chiarezza (C₅₀) o l'indice di intelligibilità del parlato (STI);</p> <p>b) per ogni valore di riferimento è esplicitato, con note da 1) a 5), in che modo il descrittore è determinato, ovvero con:</p> <p>3) valore limite massimo per cui è tollerato il x% in più in alcune bande, da specificare,</p> <p>4) valore limite massimo per cui è tollerato 0,2 s in più in alcune bande, da specificare,</p> <p>5) valore limite massimo per cui è tollerato un margine di 0,1 s per ciascuna banda considerata;</p> <p>c) nei riferimenti normativi è indicata la sigla corrispondente al Paese d'origine, alla quale ci si riferisce:</p> <p>DE Germania DIN 18041, DK-2 Danimarca ⁶⁾ DS 918 FI Finlandia ⁶⁾ SFS E249 NO Norvegia ⁶⁾ NS 8175:2008 SE Svezia ⁶⁾ SS 25268:2007 UK Regno Unito BB 93 USA Stati Uniti d'America ANSI S12.60:2002</p> <p>6) Gli ambienti sono classificati in quattro categorie in base alla qualità (da A - <i>eccellente</i> a D - <i>appena sufficiente</i>). Nei prospetti da A.1 a A.4 sono riportati i valori relativi alla classe C, ritenuta il riferimento di media qualità.</p> <p>d) Nelle note sono indicate le seguenti precisazioni:</p> <p>8) ambiente arredato, 9) ambiente non occupato dalle persone (al massimo due sperimentatori per l'esecuzione delle misure), 10) ambiente con presenza di occupanti, 11) per volumi inferiori a (specificare), 12) per volumi superiori a (specificare).</p>						

prospetto A.3 Valori di riferimento per il settore sanitario e ospedaliero

Destinazione ambiente	Descrittore ^{a)}	Valore di riferimento ^{b)}	Intervallo di frequenza (Hz)	Riferimento normativo ^{c)}	Note ^{d)}	
STANZE PER PAZIENTI						
Camere di degenza	T	≤0,8 s	-	Da 500 a 2 000	FR	
	T	≤0,6 s	³⁾ 20% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾	⁸⁾ ⁹⁾
	T	≤0,5 s	³⁾ 50% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	FI ⁶⁾	⁸⁾
Unità intensiva	T	≤0,5 s	³⁾ 20% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾	⁸⁾ ⁹⁾
Sala di osservazione	T	≤0,5 s	³⁾ 20% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾	⁸⁾ ⁹⁾
Riabilitazione	T	≤0,6 s	³⁾ 20% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾	⁸⁾ ⁹⁾
Riabilitazione al parlato	T	≤0,5 s	³⁾ 20% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾	⁸⁾ ⁹⁾
Servizi igienici	T	≤0,8 s	³⁾ 20% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾	⁸⁾ ⁹⁾
Sala visite	T	≤0,6 s	³⁾ 20% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾	⁸⁾ ⁹⁾
	T	≤0,8 s	³⁾ 50% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	FI ⁶⁾	⁸⁾
Ambulatori per test audio	T	≤0,5 s	³⁾ 50% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	FI ⁶⁾	⁸⁾
Centri operativi di controllo	T	≤0,4 s	³⁾ 50% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	FI ⁶⁾	⁸⁾



Norma Uni 11532:2014

STUDIO SOUND SERVICE SAS DI DONATO MASCI E C.
UNISTore - 2017 - 362365

prospetto A.3 Valori di riferimento per il settore sanitario e ospedaliero (Continua)

Destinazione ambiente	Descrittore ^{a)}	Valore di riferimento ^{b)}	Intervallo di frequenza (Hz)	Riferimento normativo ^{c)}	Note ^{d)}
STANZE PER IL PERSONALE					
Riposo personale	<i>T</i>	≤0,5 s		Da 500 a 2 000	FR
Cucina	<i>T</i>	≤0,5 s	³⁾ 20% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾ ^{8) 9)}
Laboratorio	<i>T</i>	≤0,6 s	³⁾ 20% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾ ^{8) 9)}
Ufficio	<i>T</i>	≤0,6 s	³⁾ 20% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾ ^{8) 9)}
LOCALI COMUNI					
Refettorio	<i>T</i>	≤0,8 s	-	Da 500 a 2 000	FR
	<i>T</i>	≤0,6 s	³⁾ 20% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾ ^{8) 9)}
Sala comune	<i>T</i>	≤0,8 s	³⁾ 20% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾ ^{8) 9)}
	<i>T</i>	≤1,0 s	³⁾ 40% - 125 Hz	Da 125 a 2 000	NO ⁶⁾ ^{8) 9)}
Sala d'attesa	<i>T</i>	≤1,2 s	-	Da 500 a 2 000	FR
	<i>T</i>	≤0,8 s	³⁾ 50% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	FI ⁶⁾ ⁸⁾
	<i>T</i>	≤0,6 s	³⁾ 20% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾ ^{8) 9)}
Sala conferenze	<i>T</i>	≤0,6 s	³⁾ 20% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾ ^{8) 9)}
Aula seminari	<i>T</i>	≤0,6 s	³⁾ 20% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾ ^{8) 9)}
LOCALI COMUNI DI SERVIZIO					
Corridoi (esterni al reparto)	<i>T</i>	≤1,2 s	-	Da 500 a 2 000	FR
	<i>T</i>	≤0,8 s	³⁾ 50% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	FI ⁶⁾ ⁸⁾
Corsia	<i>T</i>	≤0,8 s	³⁾ 20% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾ ^{8) 9)}
	<i>T</i>	≤0,8 s	³⁾ 20% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	FI ⁶⁾ ⁸⁾
Ingresso	<i>T</i>	≤0,8 s	³⁾ 20% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	SE ⁶⁾ ^{8) 9)}
Ascensore	<i>T</i>	≤0,8 s	²⁾	Da 250 a 4 000	SE ⁶⁾ ^{8) 9)}
Scale	<i>T</i>	≤0,8 s	²⁾	Da 250 a 4 000	SE ⁶⁾ ^{8) 9)}
	<i>T</i>	≤1,3 s	²⁾	Da 500 a 2 000	NO ⁶⁾ ^{8) 9)}

- Note
- a) il descrittore preso in esame può essere il tempo di riverberazione (*T*), la chiarezza (*C50*) o l'indice di intelligibilità del parlato (STI); per ogni valore di riferimento è esplicitato, con note da 1) a 5), in che modo il descrittore è determinato, ovvero con:
- b)
- 1) media aritmetica dei valori calcolati per le bande prese in esame,
 - 2) valore limite massimo riscontrabile in ciascuna banda presa in esame,
 - 3) valore limite massimo per cui è tollerato il x % in più in alcune bande, da specificare,
 - 4) valore limite massimo per cui è tollerato 0,2 s in più in alcune bande, da specificare,
 - 5) valore limite massimo per cui è tollerato un margine di 0,1 s per ciascuna banda considerata;
- c) Nei riferimenti normativi è indicata la sigla corrispondente al Paese d'origine, alla quale ci si riferisce:
- | | | |
|----|-------------------------|------------------------|
| FI | Finlandia ⁶⁾ | SFS E249 |
| FR | Francia | Decreto del 25/04/2003 |
| NO | Norvegia ⁶⁾ | NS 8175:2008 |
| SE | Svezia ⁶⁾ | SS 25268:2007 |
- 6) Gli ambienti sono classificati in quattro categorie in base alla qualità (da A - *eccellente* a D - *appena sufficiente*). Nei prospetti da A.1 a A.4 sono riportati i valori relativi alla classe C, ritenuta il riferimento di media qualità.
- d) Nelle note sono indicate le seguenti precisazioni:
- 8) ambiente arredato,
 - 9) ambiente non occupato dalle persone (al massimo due sperimentatori per l'esecuzione delle misure).



Norma Uni 11532:2014

prospetto A.4 Valori di riferimento per il settore residenziale

Destinazione ambiente	Descrittore ^{a)}	Valore di riferimento ^{b)}	Intervallo di frequenza (Hz)	Riferimento normativo ^{c)}	Note ^{d)}
LOCALI PRIVATI					
Ambienti domestici	<i>T</i>	≤0,6 s	³⁾ 50% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	FI ⁶⁾ 8)
Stanze per l'ascolto della musica	<i>T</i>	≤1,0 s	³⁾ 50% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	FI ⁶⁾ 8)
Corridoi	<i>T</i>	≤0,9 s	³⁾ 50% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	FI ⁶⁾ 8)
Assistenza domiciliare	<i>T</i>	≤0,6 s	³⁾ 50% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	FI ⁶⁾ 8)
LOCALI COMUNI					
Ingresso	<i>T</i>	≤0,9 s	4)	-	DK-2 ⁶⁾ 8)
	<i>T</i>	≤1,3 s	5)	Da 500 a 2 000	NO ⁶⁾ 8) 9)
Sale comuni	<i>T</i>	≤0,8 s	³⁾ 50% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	FI ⁶⁾ 8)
	<i>T</i>	≤0,6 s	4)	Da 125 a 4 000	DK-2 ⁶⁾ 8)
Scale	<i>T</i>	≤1,3 s	³⁾ 50% - 125 Hz	Da 500 a 2 000	DK-2 ⁶⁾ 8)
	<i>T</i>	≤1,3 s	5)	Da 500 a 2 000	NO ⁶⁾ 8) 9)
	<i>T</i>	≤1,3 s	³⁾ 50% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	FI ⁶⁾ 8)
Pianerottoli con più di due appartamenti	<i>T</i>	≤1,3 s	³⁾ 50% - 125 Hz ⁵⁾	Da 125 a 4 000	FI ⁶⁾ 8)

Note

- a) il descrittore preso in esame può essere il tempo di riverberazione (*T*), la chiarezza (*C50*) o l'indice di intelligibilità del parlato (STI);
- b) per ogni valore di riferimento è esplicitato, con note da 1) a 5), in che modo il descrittore è determinato, ovvero con:
- 3) valore limite massimo per cui è tollerato il x % in più in alcune bande, da specificare,
 - 4) valore limite massimo per cui è tollerato 0,2 s in più in alcune bande, da specificare,
 - 5) valore limite massimo per cui è tollerato un margine di 0,1 s per ciascuna banda considerata;
- c) Nei riferimenti normativi è indicata la sigla corrispondente al Paese d'origine, alla quale ci si riferisce:
- | | | |
|------|-------------------------|--------------|
| DK-2 | Danimarca ⁶⁾ | DS 918 |
| FI | Finlandia ⁶⁾ | SFS E249 |
| NO | Norvegia ⁶⁾ | NS 8175:2008 |
- 6) Gli ambienti sono classificati in quattro categorie in base alla qualità (da A - *eccellente* a D - *appena sufficiente*). Nei prospetti da A.1 a A.4 sono riportati i valori relativi alla classe C, ritenuta il riferimento di media qualità.
- d) Nelle note sono indicate le seguenti precisazioni:
- 8) ambiente arredato,
 - 9) ambiente non occupato dalle persone (al massimo due sperimentatori per l'esecuzione delle misure).



Coefficienti di isolamento



MATERIAL	THICKNESS mm	WEIGHT kg/m ²	SOURCE	FREQUENCY Hz								Rw
				63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
MASONRY												
125mm solid breeze or clinker blocks, 12mm plaster both sides	125mm	145	1, 7	20	27	33	40	50	57	56	59	44
75mm solid breeze or clinker blocks, unplastered	75mm	85	1, 7	12	17	18	20	24	30	38	43	25
75mm clinker concrete slabs 12mm plaster both sides	100mm	146	8		26	33	40	50	57	58		44
50mm clinker concrete blocks with 12mm plaster both sides	76mm	96	8		30	35	30	40	46	51		38
100mm hollow cinder concrete blocks, painted (cement based paint)	100mm	75	1, 7	22	30	34	40	50	50	52	53	45
100mm hollow cinder concrete blocks, unpainted	100mm	75	1, 7	22	27	32	37	40	41	45	48	40
110mm concrete bricks	110mm	110	10		32	30	32	38	45	49		38
100mm dense blockwork (1900 kg/m ³)	100mm	190	4		28	30	41	47	53	56		44
150mm dense blockwork (1900 kg/m ³)	150mm	285	4		31	36	43	49	55	59		47
100mm dense concrete (2300 kg/m ³)	100mm	230	11		37	39	45	52	58	62		50
150mm dense concrete (2300 kg/m ³)	150mm	345	4		29	39	45	52	60	70		48
150mm dense concrete (2300 kg/m ³)	150mm	345	12		40	43	48	55	59	63		53
200mm dense concrete (2300 kg/m ³)	200mm	460	4		42	46	50	57	60	65		55
300mm dense concrete (2300 kg/m ³)	300mm	690	4		40	45	52	59	63	67		56
100mm reinforced concrete	100mm	230	4		38	38	41	48	57	65		47
220mm cellular concrete, plaster one side	220mm	220	8		22	34	43	51	56	58		44
90mm hollow clay blocks, plaster one side	90mm	75	8		30	33	32	33	37	41		35
90mm terracotta	90mm		13		26	26	30	35	40	41		35
90mm terracotta, plastered both sides	114mm		13		32	30	33	40	49	54		39
200mm glass bricks	200mm	510	1, 7	25	30	35	40	49	49	43	45	45
100mm lightweight blockwork, fair faced	100mm	125	3		32	32	33	41	49	57		40
100mm lightweight blockwork, plaster both sides	125mm	125	3		32	34	37	45	52	57		43
100mm lightweight blockwork, with plasterboard on dabs both sides	125mm	125	3		28	34	45	53	55	52		46
Single leaf blockwork fair faced	102.5mm	125	3		36	37	40	46	54	56		45
Single leaf blockwork plaster both sides	127.5mm	240	1, 7	30	36	37	40	46	54	57	59	45
Single leaf blockwork plaster both sides	240mm	480	1, 7	34	41	45	48	56	65	69	72	54
Single leaf blockwork plaster both sides	352.5mm	720	1, 3, 7	36	44	43	49	57	66	70	72	54
200mm lightweight blockwork, fair faced	200mm	240	3		35	38	43	49	54	58		48
200mm lightweight blockwork, plaster both sides	225mm	240	3		37	39	46	53	57	61		50
200mm lightweight blockwork, with plasterboard on dabs both sides	230mm	240	3		33	39	50	55	56	60		51
100mm aircrete blocks with 9.5mm plasterboard on dabs on both sides	119mm	78	9		37	35	39	47	49	41		45
215mm aircrete blocks with 12.5mm plasterboard on dabs both sides	240mm	170	9	27	33	35	45	55	56	47		48
215mm aircrete blocks with 13mm plaster both sides	241mm	170	9	27	35	38	47	53	57	57		50



MATERIAL	THICKNESS mm	WEIGHT kg/m ²	SOURCE	FREQUENCY Hz								Rw
				63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
CAVITY MASONRY WALLS												
<i>Note. Depending upon the laboratory boundary conditions, tests on masonry cavity walls can be significantly different to the in-situ performance</i>												
Two leaves of 102.5mm brickwork, 50mm cavity, rigid wall ties	255mm	430	8		37	42	52	60	63	68		54
Two leaves of 102.5mm brickwork, 50mm cavity, rigid wall ties, plastered both sides	280mm	480	8		41	45	48	56	58	60		54
Two leaves of 280mm brick, 56mm cavity, strip ties, outer faces 12mm plaster on both sides	300mm	380	7	28	34	34	40	56	73	76	78	45
Two leaves of 280mm brick, 56mm cavity, metal ties, plaster on both sides	300mm	380	7	27	27	43	55	66	77	85	85	51
Two leaves of 75mm hollow blocks and 50mm cavity, plaster on both sides	200mm	136	8		38	48	52	57	68	78		56
Two leaves of 280mm brick, 56mm cavity, no ties, outer faces plastered 12mm	300mm	420	8		39	48	58	57	77	86		58
Two leaves of 75mm clinker concrete slabs, 50mm cavity, outer faces plastered	200mm	195	8		41	44	46	52	61	69		52
Two leaves of 100mm dense concrete blocks, 50mm cavity, wall ties, 13mm plaster on both sides	276mm	195	8		35	41	49	58	67	75		52
Two leaves of 100mm aircrete blocks, 75mm cavity, butterfly ties, 13mm plaster both sides	301mm	166	9	30	41	44	50	63	69	76		55
Two leaves of 100mm aircrete blocks, 75mm cavity, butterfly ties, 12.5mm plasterboard on dabs both sides	320mm	166	9	33	41	46	51	66	69	67		57
Triple leaf cavity wall, brickwork 112/215/112mm with 50mm cavities between leaves	539mm	935	8		53	56	62	69	78	84		67
SINGLE SHEET MATERIALS												
6mm steel plate	6mm	50	8		27	35	41	39	39	46		40
20g galvanised sheet steel	0.9mm	7	8		8	14	20	26	32	38		24
18g galvanised sheet steel	1.2mm	10	8		13	20	24	29	33	39		29
18g fluted steel panels stiffened at edges, joints sealed	1.2mm	39	8		30	20	22	30	28	31		27
19mm chipboard sheets on wood framework	19mm	11	8		17	18	25	30	26	32		27
25mm woodwool slabs unplastered	25mm	19	8		0	2	6	6	8	8		7
25mm woodwool slabs plastered (12mm on each face)	50mm	75	8		23	27	30	32	36	39		33
50mm woodwool screeded to source side	50mm	28	8		26	28	30	32	33	36		32
100mm woodwool screeded to source side	100mm	50	8		28	28	32	34	33	36		34
12mm fibreboard on wood frame	12mm	4	8		12	16	20	24	30	31		24
9mm plasterboard on wood frame 400mm	9mm	9,5	8		15	19	25	28	31			28
25mm t & g timber boards, joints sealed	25mm	14	8		21	17	22	24	30	36		25
Mahogany panels	50mm	25	8		19	23	25	30	37	42		30
9mm plywood on frame	9mm	5	8		7	13	19	25	19	22		21
18mm plywood	18mm	10	8		24	22	27	28	25	27		27
Two layers of 13mm plasterboard	25mm	22	8		24	29	31	32	30	35		32

MATERIAL	THICKNESS mm	WEIGHT kg/m ²	SOURCE	FREQUENCY Hz								Rw
				63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
STUD PARTITIONS												
9.5mm plasterboard on 50 x 100 studs at 400 centres	120mm	49	3		38	34	41	46	50	54		45
12.5mm plasterboard on 50 x 100 studs at 400 centres	145mm	51	3		25	32	34	47	39	50		39
Plasterboard 12.5mm on 50 x 100 studs at 400 centres with 25mm mineral wool between studs	165mm	73	3		25	37	42	49	46	59		44
75mm metal studs 12.7mm plasterboard each side	100mm		4		15	24	32	43	43	38		34
75mm metal studs 12.7mm plasterboard each side with 25mm glass wool in cavity	100mm		4		17	29	42	50	50	41		39
122mm metal studs, two layers of 12.7mm plasterboard each side	147mm		4		20	35	45	53	51	48		44
122mm metal studs, two layers of 12.7mm plasterboard each side with 25mm glass wool in cavity	147mm		4		24	36	51	56	59	52		46
146mm metal studs at 600 centres, two layers of 12.7mm plasterboard each side	200mm	43	3		32	41	47	49	53	58		49
178mm staggered stud partition, one layer of 15mm plasterboard each side with 50mm glass wool in cavity	308mm		4		32	48	61	69	61	58		56
FLOORS												
21mm t & g timber boards, wood joists joints sealed	21mm	13	8		21	18	22	24	30	33		26
100mm concrete slab	100mm	250	3		37	36	45	52	59	62		49
200mm concrete slab	200mm	460	3		42	41	50	57	60	65		54
300mm concrete slab	300mm	690	3		40	45	52	59	63	67		56
50mm screed on 13mm glass wool on 125mm reinforced concrete	188mm	420	4		38	43	48	54	60	64		53
65mm screed on 13mm glass wool on 125mm concrete slab	200mm	420	3		38	43	48	54	61			53
125mm reinforced concrete topped with 50mm screed	175mm		4		35	37	42	49	58	63		47
130mm concrete and 25mm screed and plaster soffit	171mm		8		37	38	43	51	60	64		48
131mm concrete and 25mm screed and plaster soffit	172mm		8		38	39	44	52	61	65		49
200mm reinforced concrete topped with 50mm screed	250mm		4		38	45	47	52	60	64		52
150mm concrete and hollow tile and wood floor on 50 x 50 battens and plaster soffit			8		36	38	39	47	54	55		46



MATERIAL	THICKNESS mm	WEIGHT kg/m ²	SOURCE	FREQUENCY Hz								Rw
				63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
SINGLE GLAZED WINDOWS												
6mm glass in unsealed openable frames, tightly closed	6mm	15	8		20	24	28	29	26	30		28
6mm glass in sealed frame	6mm	15	8		17	24	30	28	24	28		27
6mm glass in heavy frame	6mm	15	8		25	28	31	34	30	37		32
6mm glass set in gaskets in wooden frame	6mm	15	14		23	26	31	33	26	33		31
6.4mm laminated glass	6.4mm	15	3		22	24	30	36	33	38		33
7mm acoustic laminate glass	7mm	15	4		24	26	32	37	40	37		36
8mm glass in heavy frame	8mm	20	1		18	25	31	32	28	36		31
9mm glass in heavy frame	9mm	22,5	1		22	26	31	30	32	39		32
9mm acoustic laminate glass	9mm	26	4		26	29	34	39	40	39		38
10mm glass	10mm	26	4		26	27	34	35	36	44		35
11mm acoustic laminate glass	11mm	26	4		28	31	35	40	38	44		38
12mm glazing in sealed frame	12mm	30	8		24	27	27	27	29	41		28
12mm glass	12mm	30	3		26	30	35	34	39	47		37
13mm acoustic laminate glass	13mm	30	4		30	32	37	41	39	46		39
16mm glass in heavy frame	16mm	40	1		25	28	33	30	38	45		34
16mm acoustic laminate glass	16mm	40	4		29	31	38	40	39	50		39
19mm glass	19mm	40	4		28	32	37	37	46	54		40
25mm single glass in heavy frame	25mm	62,5	1		27	31	30	33	43	48		35
DOUBLE GLAZED WINDOWS												
4/12/4 sealed units	20mm		3		22	17	24	37	41	38		29
4/12/4 double glazing	20mm		4		24	20	25	35	38	35		31
4/12/12 sealed units	28mm		3		25	22	33	41	44	44		36
4/150/4 with absorbent reveal	158mm	20	8		38	35	41	54	48	38		45
4/180/6 absorbant reveals, tightly closed	190mm		8		23	37	41	34	39	35		38
4/200/4	208mm		3		27	33	39	42	46	44		42
4/200/4 sealed frame, absorbent reveals	208mm		8		30	35	43	46	47	39		45
4/200/4 opposite sliders open 25mm	208mm		3		15	23	34	32	28	32		31
4/200/4 opposite sliders open 100mm	208mm		3		10	16	27	25	27	27		26
6/12/6 sealed units	24mm		3, 4		20	19	29	38	36	45		32
6/12/10 sealed units	28mm		3, 4		26	27	34	40	38	46		37
6/12/11 acoustic laminate	29mm		4		26	28	38	47	43	51		40
6/20/12 double glazing	38mm		3		26	34	40	42	40	50		41
6/100/4 double glazing	110mm		4		26	34	44	56	53	52		45
6/150/4	160mm		3, 4		29	35	45	56	52	50		47
6/150/4 unsealed openable frame, absorbent reveal	160mm	25	8		25	28	50	51	45	42		42
6/50/6	62mm	34	8		25	29	34	41	45	53		39
6/100/6 sound absorptive reveals	112mm	34	5		28	35	45	47	48	54		45
6/188/6	200mm	34	8		30	35	41	48	50	56		46
6/188/6 cavity with absorptive reveals	200mm	34	8		33	39	42	48	50	57		47
6/200/6	212mm		3		37	41	48	54	47	47		49
6/200/6 sealed frame, cavity with absorbent reveals	212mm	30	8		38	41	49	56	49	40		50
6.4 lam/12/10	28.4mm		3, 4		27	29	36	41	42	52		39
6/200/9 cavity with absorbent reveals	215mm	42	8		36	45	58	59	55	66		55
6/200/10 double glazing	210mm		4		35	46	46	46	56	65		49
9/340/9 sealed frame, absorbent reveals	358mm		8		38	43	49	53	63	63		53
10/12/16 acoustic laminate	38mm		4		30	33	42	41	42	56		42
13/12/13 acoustic laminate	38mm		4		28	34	44	52	47	55		45



MATERIAL	THICKNESS mm	WEIGHT kg/m ²	SOURCE	FREQUENCY Hz								Rw
				63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
SINGLE GLAZED WINDOWS												
6mm glass in unsealed openable frames, tightly closed	6mm	15	8		20	24	28	29	26	30		28
6mm glass in sealed frame	6mm	15	8		17	24	30	28	24	28		27
6mm glass in heavy frame	6mm	15	8		25	28	31	34	30	37		32
6mm glass set in gaskets in wooden frame	6mm	15	14		23	26	31	33	26	33		31
6.4mm laminated glass	6.4mm	15	3		22	24	30	36	33	38		33
7mm acoustic laminate glass	7mm	15	4		24	26	32	37	40	37		36
8mm glass in heavy frame	8mm	20	1		18	25	31	32	28	36		31
9mm glass in heavy frame	9mm	22,5	1		22	26	31	30	32	39		32
9mm acoustic laminate glass	9mm	26	4		26	29	34	39	40	39		38
10mm glass	10mm	26	4		26	27	34	35	36	44		35
11mm acoustic laminate glass	11mm	26	4		28	31	35	40	38	44		38
12mm glazing in sealed frame	12mm	30	8		24	27	27	27	29	41		28
12mm glass	12mm	30	3		26	30	35	34	39	47		37
13mm acoustic laminate glass	13mm	30	4		30	32	37	41	39	46		39
16mm glass in heavy frame	16mm	40	1		25	28	33	30	38	45		34
16mm acoustic laminate glass	16mm	40	4		29	31	38	40	39	50		39
19mm glass	19mm	40	4		28	32	37	37	46	54		40
25mm single glass in heavy frame	25mm	62,5	1		27	31	30	33	43	48		35
DOUBLE GLAZED WINDOWS												
4/12/4 sealed units	20mm		3		22	17	24	37	41	38		29
4/12/4 double glazing	20mm		4		24	20	25	35	38	35		31
4/12/12 sealed units	28mm		3		25	22	33	41	44	44		36
4/150/4 with absorbent reveal	158mm	20	8		38	35	41	54	48	38		45
4/180/6 absorbant reveals, tightly closed	190mm		8		23	37	41	34	39	35		38
4/200/4	208mm		3		27	33	39	42	46	44		42
4/200/4 sealed frame, absorbent reveals	208mm		8		30	35	43	46	47	39		45
4/200/4 opposite sliders open 25mm	208mm		3		15	23	34	32	28	32		31
4/200/4 opposite sliders open 100mm	208mm		3		10	16	27	25	27	27		26
6/12/6 sealed units	24mm		3, 4		20	19	29	38	36	45		32
6/12/10 sealed units	28mm		3, 4		26	27	34	40	38	46		37
6/12/11 acoustic laminate	29mm		4		26	28	38	47	43	51		40
6/20/12 double glazing	38mm		3		26	34	40	42	40	50		41
6/100/4 double glazing	110mm		4		26	34	44	56	53	52		45
6/150/4	160mm		3, 4		29	35	45	56	52	50		47
6/150/4 unsealed openable frame, absorbent reveal	160mm	25	8		25	28	50	51	45	42		42
6/50/6	62mm	34	8		25	29	34	41	45	53		39
6/100/6 sound absorptive reveals	112mm	34	5		28	35	45	47	48	54		45
6/188/6	200mm	34	8		30	35	41	48	50	56		46
6/188/6 cavity with absorptive reveals	200mm	34	8		33	39	42	48	50	57		47
6/200/6	212mm		3		37	41	48	54	47	47		49
6/200/6 sealed frame, cavity with absorbent reveals	212mm	30	8		38	41	49	56	49	40		50
6.4 lam/12/10	28.4mm		3, 4		27	29	36	41	42	52		39
6/200/9 cavity with absorbent reveals	215mm	42	8		36	45	58	59	55	66		55
6/200/10 double glazing	210mm		4		35	46	46	46	56	65		49
9/340/9 sealed frame, absorbent reveals	358mm		8		38	43	49	53	63	63		53
10/12/16 acoustic laminate	38mm		4		30	33	42	41	42	56		42
13/12/13 acoustic laminate	38mm		4		28	34	44	52	47	55		45



MATERIAL	THICKNESS mm	WEIGHT kg/m ²	SOURCE	FREQUENCY Hz								Rw
				63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
DOORS												
Flush panel, hollow core, normal gaps at edges	43mm	9	4		12	13	14	16	18	24		17
Plywood door, hollow core, no gaskets			15		12	11	14	17	16	16		16
Plywood door, hollow core, with gaskets on top and sides			16		13	15	17	22	21	21		21
Solid core wood door, no seals around perimeter		24	5		19	22	26	24	23	20		25
Solid core wood door with foam tape seals around perimeter		24	5		22	25	29	25	26	28		27
Solid core wood door with magnetic seals around perimeter		24	5		25	29	30	27	30	34		30
Solid-core door, 40mm with perimeter and threshold seals	40mm		4		17	21	26	29	31	34		29
Solid core door with drop seals and gaskets			17		21	24	27	37	39	38		34
Single leaf acoustic doorset with perimeter and threshold seals			4		15	29	25	29	34	38		30
Steel door with good seals	50mm		3		21	27	32	34	36	36		34
Hollow-core steel door, 18g steel faces; no seals around perimeter		26	5		13	15	16	17	18	20		18
Steel acoustic doorset with perimeter and threshold seals			4		34	37	38	38	41	42		40
Acoustic door, double heavy sheet steel skin, absorbent in airspace, acoustic metal doorset and double seals in heavy steel frame	100mm		8		35	39	44	49	54	57		48
50mm solid wood, normal hanging	50mm		8		15	20	22	16	24	24		21



Coefficienti di assorbimento



MATERIAL	THICKNESS	SOURCE	FREQUENCY Hz							
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MASONRY WALLS										
Rough concrete		5		0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07	
Smooth unpainted concrete		5		0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,05	
Smooth concrete, painted or glazed		5		0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	
Porous concrete blocks (no surface finish)		1		0,05	0,05	0,05	0,08	0,14	0,2	
Clinker concrete (no surface finish)		19		0,10	0,20	0,40	0,60	0,50	0,60	
Smooth brickwork with flush pointing		5		0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07	
Smooth brickwork with flush pointing, painted		4		0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	
Standard brickwork		20	0,05	0,05	0,04	0,02	0,04	0,05	0,05	0,05
Brickwork, 10mm flush pointing		1		0,08	0,09	0,12	0,16	0,22	0,24	
Lime cement plaster on masonry wall		19		0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	
Glaze plaster on masonry wall		19		0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	
Painted plaster surface on masonry wall		19		0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	
Plaster on masonry wall with wall paper on backing paper		19		0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	
Ceramic tiles with smooth surface		19		0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	
Breeze block		20	0,10	0,20	0,45	0,60	0,40	0,45	0,40	0,40
Plaster on solid wall		20	0,04	0,04	0,05	0,06	0,08	0,04	0,06	0,05
Plaster, lime or gypsum on solid backing		18		0,03	0,03	0,02	0,03	0,04	0,05	
STUDWORK AND LIGHTWEIGHT WALLS										
Plasterboard on battens, 18mm airspace with glass wool		18		0,30	0,20	0,15	0,05	0,05	0,05	
Plasterboard on frame, 100mm airspace		18		0,30	0,12	0,08	0,06	0,06	0,05	
Plasterboard on frame, 100mm airspace with glass wool		18		0,08	0,11	0,05	0,03	0,02	0,03	
Plasterboard on 50mm battens		18		0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09	
Plasterboard on 25mm battens		18		0,31	0,33	0,14	0,10	0,10	0,12	
2 x plasterboard on frame, 50mm airspace with mineral wool	2 x 13mm	18		0,15	0,10	0,06	0,04	0,04	0,05	
Plasterboard on cellular core partition		18		0,15	0,00	0,07	0,00	0,04	0,05	
Plasterboard on frame 100mm cavity	13mm	9		0,08	0,11	0,05	0,03	0,02	0,03	
Plasterboard on frame, 100mm cavity with mineral wool	13mm	9		0,30	0,12	0,08	0,06	0,06	0,05	
2 x 13mm plasterboard on steel frame, 50mm mineral wool in cavity, surface painted	26mm	7		0,15	0,01	0,06	0,04	0,04	0,05	
GLASS AND GLAZING										
4mm glass	4mm	21		0,30	0,20	0,10	0,07	0,05	0,02	
6mm glass	6mm	21		0,10	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	
Double glazing, 2-3mm glass, 10mm air gap		18		0,15	0,05	0,03	0,03	0,02	0,02	



MATERIAL	THICKNESS	SOURCE	FREQUENCY Hz							
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
WOOD AND WOOD PANELLING										
3-4mm plywood, 75mm cavity containing mineral wool	1			0,5	0,3	0,1	0,05	0,05	0,05	
5mm plywood on battens, 50mm airspace filled with 12mm plywood over 50mm airgap	1	18		0,40	0,35	0,20	0,15	0,05	0,05	
12mm plywood over 150mm airgap	1			0,25	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	
12mm plywood over 200mm airgap containing 50mm mineral wool	1			0,28	0,08	0,07	0,07	0,09	0,09	
Plywood mounted solidly		18		0,14	0,10	0,10	0,08	0,10	0,08	
12mm plywood in framework with 30mm airspace behind	12mm	18		0,05		0,05		0,05	0,05	
12mm plywood in framework with 30mm airspace containing glass wool	12mm	18		0,35	0,20	0,15	0,10	0,05	0,05	
Plywood, hardwood panels over 25mm airspace on solid backing		18		0,40	0,20	0,15	0,10	0,10	0,05	
Plywood, hardwood panels over 25mm airspace on solid backing with absorbent material in air space		18		0,30	0,20	0,15	0,10	0,10	0,05	
12mm wood panelling on 25mm battens	12mm	18		0,40	0,25	0,15	0,10	0,10	0,05	
Timber boards, 100mm wide, 10mm gaps, 500mm airspace with mineral wool	22mm	18		0,31	0,33	0,14	0,10	0,10	0,12	
t & g board on frame, 50mm airspace with mineral wool	16mm	18		0,05	0,25	0,60	0,15	0,05	0,10	
16-22mm t&g wood on 50mm cavity filled with mineral wool		5		0,25	0,15	0,1	0,09	0,08	0,07	
Cedar, slotted and profiled on battens mineral wool in airspace		22		0,20	0,62	0,98	0,62	0,21	0,15	
Wood boards on on joists or battens		18		0,15	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	
20mm dense veneered chipboard over 100mm airgap		1		0,03	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	
20mm dense veneered chipboard over 200mm airgap		1		0,06	0,10	0,08	0,09	0,07	0,04	
20mm dense veneered chipboard over 250mm airgap containing 50mm mineral wool		1		0,12	0,10	0,08	0,07	0,10	0,08	
6mm wood fibre board, cavity > 100mm, empty		5		0,3	0,2	0,2	0,1	0,05	0,05	
22mm chipboard, 50mm cavity filled with mineral wool		5		0,12	0,04	0,06	0,05	0,05	0,05	
Acoustic timber wall panelling		18		0,18	0,34	0,42	0,59	0,83	0,68	
Hardwood, mahogany		18		0,19	0,23	0,25	0,30	0,37	0,42	
Chipboard on 16mm battens	20mm	18		0,20	0,25	0,20	0,20	0,15	0,20	
Chipboard on frame, 50mm airspace with mineral wool	22mm	18		0,12	0,04	0,06	0,05	0,05	0,05	



MATERIAL	THICKNESS	SOURCE	FREQUENCY Hz							
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MINERAL WOOL AND FOAMS										
Melamine based foam 25mm		18		0,09	0,22	0,54	0,76	0,88	0,93	
Melamine based foam 50mm		18		0,18	0,56	0,96	1,00	1,00	1,00	
Glass wool 25mm 16 kg/m3		18		0,12	0,28	0,55	0,71	0,74	0,83	
Glass wool 50mm, 16 kg/m3		18		0,17	0,45	0,80	0,89	0,97	0,94	
Glass wool 75mm, 16 kg/m3		18		0,30	0,69	0,94	1,00	1,00	1,00	
Glass wool 100mm, 16 kg/m3		18		0,43	0,86	1,00	1,00	1,00	1,00	
Glass wool 25mm, 24 kg/m3		18		0,11	0,32	0,56	0,77	0,89	0,91	
Glass wool 50mm, 24 kg/m3		18		0,27	0,54	0,94	1,00	0,96	0,96	
Glass wool 75mm, 24 kg/m3		18		0,28	0,79	1,00	1,00	1,00	1,00	
Glass wool 100mm, 24 kg/m3		18		0,46	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Glass wool 50mm, 33 kg/m3		18		0,20	0,55	1,00	1,00	1,00	1,00	
Glass wool 75mm, 33 kg/m3		18		0,37	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	
Glass wool 100mm, 33 kg/m3		18		0,53	0,92	1,00	1,00	1,00	1,00	
Glass wool 50mm, 48 kg/m3		18		0,30	0,80	1,00	1,00	1,00	1,00	
Glass wool 75mm, 48 kg/m3		18		0,43	0,97	1,00	1,00	1,00	1,00	
Glass wool 100mm, 48 kg/m3		18		0,65	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Rock wool 50mm, 33 kg/m3 direct to masonry	17			0,15	0,60	0,90	0,90	0,90	0,85	
Rock wool 100mm, 33 kg/m3 direct to masonry	17			0,35	0,95	0,98	0,92	0,90	0,85	
Rock wool 50mm, 60 kg/m3 direct to masonry	17			0,11	0,60	0,96	0,94	0,92	0,82	
Rock wool 75mm, 60 kg/m3 direct to masonry	17			0,34	0,95	0,98	0,82	0,87	0,86	
Rock wool 30mm, 100 kg/m3 direct to masonry	17			0,10	0,40	0,80	0,90	0,90	0,90	
Rock wool 30mm, 200 kg/m3 over 300mm air gap	17			0,40	0,75	0,90	0,80	0,90	0,85	
Glass wool or mineral wool on solid backing	25mm	18		0,20	0,00	0,70	0,00	0,90	0,80	
Glass wool or mineral wool on solid backing	50mm	18		0,30	0,00	0,80	0,00	0,95	0,90	
Glass wool or mineral wool over air space on solid backing	25mm	18		0,40	0,00	0,80	0,00	0,90	0,80	
Fibreglass super fine mat	50mm	18		0,15	0,40	0,75	0,85	0,80	0,85	
Fibreglass scrim-covered sewn sheet	40mm	18		0,40	0,80	0,95	0,95	0,80	0,85	
Fibreglass bitumen bonded mat	25mm	18		0,10	0,35	0,50	0,55	0,70	0,70	
Fibreglass bitumen bonded mat	50mm	18		0,30	0,55	0,80	0,85	0,75	0,80	
Fibreglass resin-bonded mat	25mm	18		0,10	0,35	0,55	0,65	0,75	0,80	
Fibreglass resin-bonded mat	50mm	18		0,20	0,50	0,70	0,80	0,75	0,80	
Fibreglass resin-bonded board	25mm	18		0,10	0,25	0,55	0,70	0,80	0,85	
Flexible polyurethane foam 50mm		18		0,25	0,50	0,85	0,95	0,90	0,90	
Rigid polyurethane foam 50mm		18		0,20	0,40	0,65	0,55	0,70	0,70	
12mm expanded polystyrene on 45mm battens		18		0,05	0,15	0,40	0,35	0,20	0,20	
25mm expanded polystyrene on 50mm battens		18		0,10	0,25	0,55	0,20	0,10	0,15	



MATERIAL	THICKNESS	SOURCE	FREQUENCY Hz							
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
WALL TREATMENTS & CONSTRUCTIONS										
Cork tiles 25mm on solid backing		18		0,05	0,10	0,20	0,55	0,60	0,55	
Cork board, 25mm on solid backing	25mm	18		0,03	0,05	0,17	0,52	0,50	0,52	
Cork board, 25mm, 2.9kg/m2, on battens	25mm	18		0,15	0,40	0,65	0,35	0,35	0,30	
Glass blocks or glazed tiles as wall finish		18		0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	
Muslin covered cotton felt	25mm	18		0,15	0,45	0,70	0,85	0,95	0,85	
Pin up boarding- medium hardboard on solid backing		18		0,05	0,00	0,10	0,00	0,10	0,10	
Fibreboard on solid backing	12mm	20	0,05	0,05	0,10	0,15	0,25	0,30	0,30	0,25
25mm thick hair felt, covered by scrim cloth on solid backing	25mm	18		0,10	0,00	0,70	0,00	0,80	0,80	
Fibreboard on solid backing	soft 12mm	18		0,05	0,00	0,15	0,00	0,30	0,30	
Fibreboard on solid backing - painted		18		0,05	0,00	0,10	0,00	0,15	0,15	
Fibreboard over airspace on solid wall	12mm	18		0,30	0,00	0,30	0,00	0,30	0,30	
Fibreboard over airspace on solid wall - painted		18		0,30	0,00	0,15	0,00	0,10	0,10	
Plaster on lath, deep air space		18		0,20	0,15	0,10	0,05	0,05	0,05	
Plaster decorative panels, walls				0,20	0,15	0,10	0,08	0,04	0,02	
Acoustic plaster to solid backing	25mm	18		0,03	0,15	0,50	0,80	0,85	0,80	
9mm acoustic plaster to solid backing	9mm			0,02	0,08	0,30	0,60	0,80	0,90	
9mm acoustic plaster on plasterboard, 75mm airspace	9mm			0,30	0,30	0,60	0,8	0,75	0,75	
12.5mm acoustic plaster on plaster backing over 75mm air space	12.5mm			0,35	0,35	0,40	0,55	0,70	0,70	
Woodwool slabs, unplastered on solid backing	25mm	18		0,10	0,00	0,40	0,00	0,60	0,60	
Woodwool slabs, unplastered on solid backing	50mm	18		0,10	0,20	0,45	0,80	0,60	0,75	
Woodwool slabs, unplastered on solid backing	75mm	18		0,20	0,00	0,80	0,00	0,80	0,80	
Woodwool slabs, unplastered over 20mm airspace on solid backing	25mm	18		0,15	0,00	0,60	0,00	0,60	0,70	
Plasterboard backed with 25mm thick bitumen-bonded fibreglass on 50mm battens	10mm	18		0,30	0,20	0,15	0,05	0,05	0,05	
Curtains hung in folds against solid wall		20	0,05	0,05	0,15	0,35	0,40	0,50	0,50	0,40
Cotton Curtains (0.5kg/m2), draped to 75% area approx. 130mm from wall		7		0,30	0,45	0,65	0,56	0,59	0,71	
Lightweight curtains (0.2 kg/m2) hung 90mm from wall		12		0,05	0,06	0,39	0,63	0,70	0,73	
Curtains of close-woven glass mat hung 50mm from wall		1		0,03	0,03	0,15	0,40	0,50	0,50	
Curtains, medium velour, 50% gather, over solid backing		18		0,05	0,25	0,40	0,50	0,60	0,50	
Curtains (medium fabrics) hung straight and close to wall		18		0,05	0,00	0,25	0,00	0,30	0,40	
Curtains in folds against wall		18		0,05	0,15	0,35	0,40	0,50	0,50	
Curtains (medium fabrics) double widths in folds spaced away from wall		18		0,10	0,00	0,40	0,00	0,50	0,60	
Acoustic banner, 0.5 kg/m2 wool serge, 100mm from wall		18		0,11	0,40	0,70	0,74	0,88	0,89	



MATERIAL	THICKNESS	SOURCE	FREQUENCY Hz							
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
FLOORS										
Smooth marble or terrazzo slabs		1		0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	
Raised computer floor, steel-faced 45mm chipboard 800mm above concrete floor, no carpet		13		0,08	0,07	0,06	0,07	0,08	0,08	
Raised computer floor, steel-faced 45mm chipboard 800mm above concrete floor, office-grade carpet tiles		13		0,27	0,26	0,52	0,43	0,51	0,58	
Wooden floor on joists		6		0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07	
Parquet fixed in asphalt, on concrete		6		0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07	
Parquet on counterfloor		5		0,20	0,15	0,10	0,10	0,05	0,10	
Linoleum or vinyl stuck to concrete		7		0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	
Layer of rubber, cork, linoleum + underlay, or vinyl+underlay stuck to concrete		7		0,02	0,02	0,04	0,05	0,05	0,10	
5mm needle-felt stuck to concrete	5mm	1		0,01	0,02	0,05	0,15	0,30	0,40	
6mm pile carpet bonded to closed-cell foam underlay	6mm	8		0,03	0,09	0,25	0,31	0,33	0,44	
6mm pile carpet bonded to open-cell foam underlay	6mm	8		0,03	0,09	0,20	0,54	0,70	0,72	
9mm pile carpet, tufted on felt underlay	9mm	8		0,08	0,08	0,30	0,60	0,75	0,80	
Composition flooring		20	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Haircord carpet on felt underlay	6mm	20	0,05	0,05	0,05	0,10	0,20	0,45	0,65	0,65
Medium pile carpet on sponge rubber underlay	10mm	20	0,50	0,50	0,10	0,30	0,50	0,65	0,70	0,65
Thick pile carpet on sponge rubber underlay	15mm	20	0,05	0,15	0,25	0,50	0,60	0,70	0,70	0,65
Rubber floor tiles	6mm	20	0,05	0,05	0,05	0,10	0,10	0,05	0,05	0,05
Carpet, thin, over thin felt on concrete		18		0,10	0,15	0,25	0,30	0,30	0,30	
Carpet, thin, over thin felt on wood floor		18		0,20	0,25	0,30	0,30	0,30	0,30	
Carpet, needlepunch	5mm	18		0,03	0,05	0,05	0,25	0,35	0,50	
Stone floor, plain or tooled or granolithic finish		18		0,02	0,00	0,02	0,00	0,05	0,05	
Corkfloor tiles	14mm	18		0,00	0,05	0,15	0,25	0,25	0,00	
Sheet rubber (hard)	6mm	18		0,00	0,05	0,05	0,10	0,05	0,00	
Woodblock/linoleum/rubber/cork tiles (thin) on solid floor (or wall)		18		0,02	0,04	0,05	0,05	0,10	0,05	
Floor tiles, plastic or linoleum		18		0,03	0,00	0,03	0,00	0,05	0,05	
Steel decking		18		0,13	0,09	0,08	0,09	0,11	0,11	



MATERIAL	THICKNESS	SOURCE	FREQUENCY Hz							
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
PANELS AND DOORS										
Wood hollowcore door		18		0,30	0,25	0,15	0,10	0,10	0,07	
Solid timber door		5		0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10	
Acoustic door, steel frame, double seals, absorbant in airspace, Double sheet steel skin.				0,35	0,39	0,44	0,49	0,54	0,57	
CEILING										
Mineral wool tiles, 180mm airspace		18		0,42	0,72	0,83	0,88	0,89	0,80	
Mineral wool tiles, glued/screwed to soffit		18		0,06	0,40	0,75	0,95	0,96	0,83	
Gypsum plaster tiles, 17% perforated, 22mm		18		0,45	0,70	0,80	0,80	0,65	0,45	
Under purlin lining profiled steel sheet (30% perforated), fleece layer and 180mm thick 23 Kg/m ³ rockwool insulation.		23	0,06	0,09	0,11	0,17	0,4	0,44	0,40	0,46
Perforated underside of structural steel decking (typical, depends on perforations)		14		0,30	0,70	0,85	0,90	0,70	0,65	
12% perforated plaster tiles, absorbent felt glued to back, 200mm ceiling void		15		0,45	0,70	0,88	0,52	0,42	0,35	
100mm woodwool slabs on 25mm cavity, pre-screeded surface facing cavity		16		0,50	0,75	0,85	0,65	0,70	0,70	
50mm woodwool slabs on 25mm cavity, pre-screeded surface facing cavity		16		0,30	0,40	0,50	0,85	0,50	0,65	
100mm woodwool fixed directly to concrete, pre-screeded surface facing backing		16		0,25	0,80	0,85	0,65	0,70	0,75	
75mm woodwool fixed directly to concrete, pre-screeded surface facing backing		16		0,15	0,40	0,95	0,60	0,70	0,60	
Plasterboard 10mm thick backed with 25mm thick bitumen	10mm	18		0,30	0,20	0,15	0,05	0,05	0,05	
Plasterboard 10mm thick, perforated 8mm diameter holes 2755m ² 14% open area backed with 25mm thick bitumen- bonded fibreglass on 90mm battens	10mm	18		0,25	0,70	0,85	0,55	0,40	0,30	
Plywood, 5mm, on battens 50mm airspace filled with glass wool	5mm	18		0,40	0,35	0,20	0,15	0,05	0,05	
Plywood, 12mm, with 30mm thick fibreglass backing between 30mm battens		18		0,40	0,20	0,15	0,10	0,10	0,05	
Plywood 12mm thick perforated 5mm diameter holes 6200 m ² 11% open area with 60mm deep air space behind		18		0,20	0,35	0,55	0,30	0,25	0,30	
Plywood 12mm thick perforated 5mm diameter holes 6200 m ² 11% open area backed with 60mm thick fibreglass between mounting battens		18		0,40	0,90	0,80	0,50	0,40	0,30	
Hardboard, 25% perforated over 50mm mineral wool		18		0,27	0,87	1,00	1,00	0,98	0,96	
0.8mm unperforated metal panels backed with 25mm thick resin bonded fibreglass, mounted on 22mm diameter pipes 135mm from wall.	0.8mm	18		0,50	0,35	0,15	0,05	0,05	0,00	
0.8mm perforated metal tiles 2mm diameter holes 29440/m ² . 13% open area backed with 25mm thick resin-bonded fibreglass slab. No airspace.	0.8mm	18		0,10	0,30	0,60	0,75	0,80	0,80	
50mm mineral wool (96 kg/m ³) behind 25% open area perforated steel.	50mm	18		0,20	0,35	0,65	0,85	0,90	0,80	
Wood panels, 18mm alternate 15mm slot & 35mm wooden slat	18mm	18		0,10	0,36	0,74	0,91	0,61	0,50	
25mm rockwool backing, 32mm airspace behind Plaster decorative panels, ceilings				0,20	0,22	0,18	0,15	0,15	0,16	



MATERIAL	THICKNESS	SOURCE	FREQUENCY Hz							
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
AUDIENCE AND SEATING										
Children, standing (per child) in m2 units		18		0,12	0,22	0,37	0,40	0,42	0,37	
Children, seated in plastic or metal chairs (per child) in m2 units		18		0,28	0,00	0,33	0,00	0,37	0,37	
Students seated in tablet arm chairs		18		0,30	0,41	0,49	0,84	0,87	0,84	
Adults per person seated		18		0,33	0,40	0,44	0,45	0,45	0,45	
Adults per person standing		18		0,15	0,38	0,42	0,43	0,45	0,45	
Empty plastic or metal chairs (per chair) in m2 units		18		0,07	0,00	0,14	0,00	0,14	0,14	
Seats, leather covers, per m2		18		0,40	0,50	0,58	0,61	0,58	0,50	
Cloth-upholstered seats, per m2		18		0,44	0,60	0,77	0,89	0,82	0,70	
Floor and cloth-upholstered seats, per m2		18		0,49	0,66	0,80	0,88	0,82	0,70	
Adults in plastic and metal chairs in m2 units		18		0,30	0,00	0,40	0,00	0,43	0,40	
Adults in wooden or padded chairs or seats (per item) in m2		18		0,16	0,00	0,40	0,00	0,44	0,40	
Adults on timber seats, 1 per m2 per item		10		0,16	0,24	0,56	0,69	0,81	0,78	
Adults on timber seats, 2 per m2 per item		10		0,24	0,40	0,78	0,98	0,96	0,87	
Wooden or padded chairs or seats (per item) in m2		18		0,08	0,00	0,15	0,00	0,18	0,20	
Seating, slightly upholstered, unoccupied		18		0,07	0,12	0,26	0,42	0,50	0,55	
Seating, slightly upholstered, occupied		18		0,32	0,62	0,74	0,76	0,81	0,90	
Fully upholstered seats (per item) in m2		18		0,12	0,00	0,28	0,00	0,32	0,37	
Upholstered tip-up theatre seats, empty		4		0,33	0,51	0,64	0,71	0,77	0,81	
Areas with audience, orchestra, or seats, including narrow aisles		5		0,60	0,74	0,88	0,96	0,93	0,85	
Auditorium seat, unoccupied		18		0,13	0,33	0,59	0,58	0,61	0,62	
Auditorium seat, occupied		18		0,37	0,48	0,68	0,73	0,77	0,74	
Orchestra with instruments on podium, 1.5 m2 per person		5		0,27	0,53	0,67	0,93	0,87	0,80	
Orchestral player with instrument (average) per person		18		0,37	0,80	1,00	1,00	1,00	1,00	
Proscenium opening with average stage set per m2 of opening		18		0,20	0,00	0,30	0,00	0,40	0,50	
Wood platform with large space beneath		18		0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10	
Adult office furniture per desk		18		0,50	0,40	0,45	0,45	0,60	0,70	



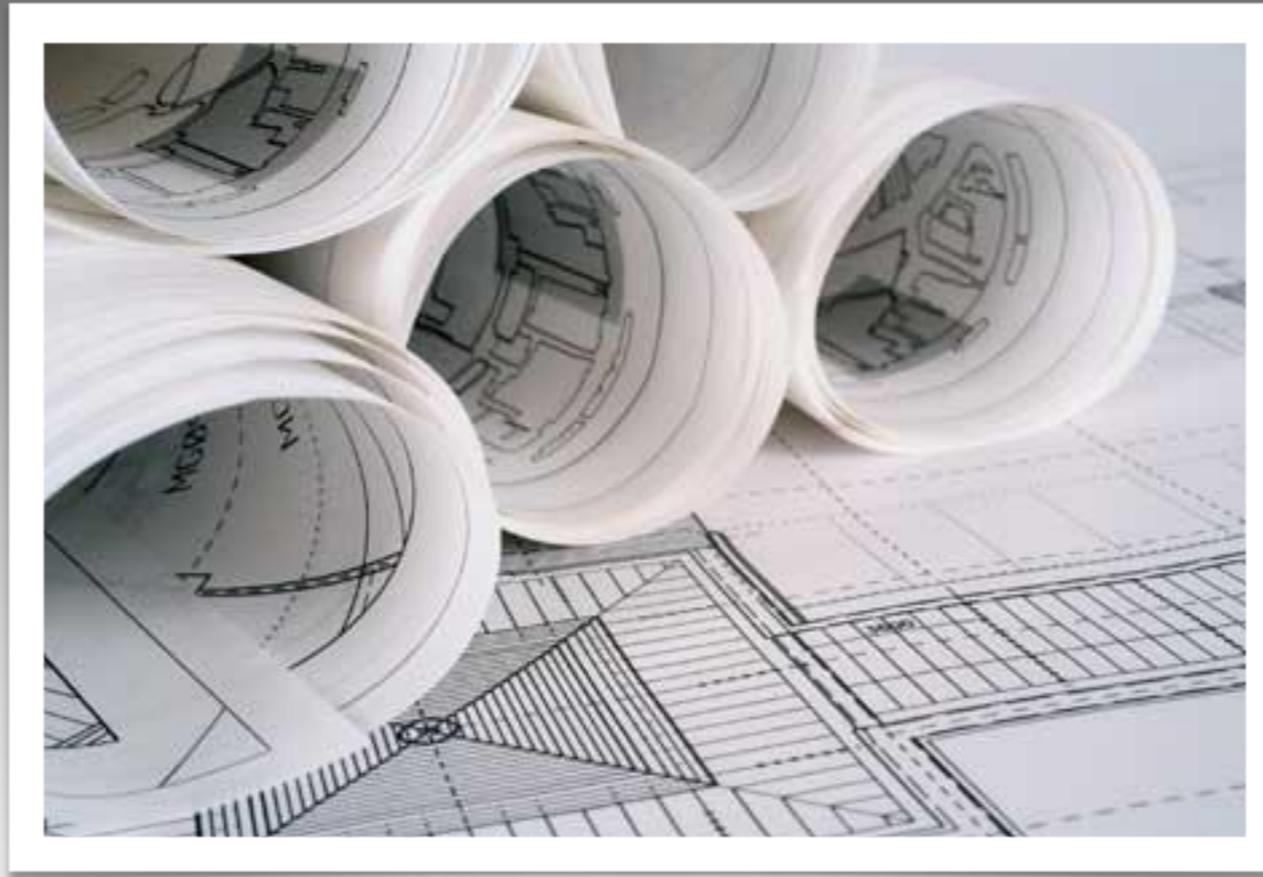
Chiave di Lettura

Riportiamo la tabella relativa ai valori ottimali per destinazione d'uso: attenzione, non è sempre necessaria la più alta intelligibilità del parlato, anzi le sale con troppa intelligibilità possono essere fastidiose!

Categoria		Valori di STI	Tipo di informazione	Esempio per destinazione d'uso	Commenti
A+	Eccellente	> 0.76		Studi di registrazione	Intelligibilità eccellente ma raramente raggiungibile
A	buono	0.72 ÷ 0.76	Messaggi complessi, parole non comuni	Teatri, <u>auditorium</u> , sale conferenza, tribunali, sistemi d'ascolto assistito (AHS)	Alta Intelligibilità del parlato
B		0.68 ÷ 0.72		Teatri, <u>auditorium</u> , teleconferenza, sale conferenza, tribunali	
C		0.64 ÷ 0.68			
D		0.60 ÷ 0.64	Messaggi complessi, parole comuni	Aule magne, classi, sale concerto	Buona intelligibilità del parlato
E	discreto	0.56 ÷ 0.60	Messaggi complessi, situazione comune	Sale concerto, chiese moderne	Sistema PA di alta qualità
F		0.52 ÷ 0.56		Sistemi PA in centri commerciali, uffici pubblici, cattedrali, sistemi VA	Sistema PA di buona qualità
G		0.48 ÷ 0.52		Centri commerciali, uffici pubblici, sistemi VA	Valore target per sistema VA
H		0.44 ÷ 0.48		Messaggi semplici, parole comuni	Sistemi VA e PA in ambienti con problemi acustici
I	scadente	0.40 ÷ 0.44	Messaggi semplici, situazione comune	Sistemi VA e PA in ambienti con grossi problemi acustici	
J		0.36 ÷ 0.40		Non utilizzabile per PA	
U	inaccettabile	< 0.36	-	Non utilizzabile per PA	

1. Questi valori devono essere considerati come minimi per svolgere la relativa destinazione d'uso;
2. L'intelligibilità percepita in ogni categoria dipenderà anche dalla risposta in frequenza;
3. I valori di STI si riferiscono a valori misurati in posizione d'ascolto campione o come richiesto dagli standard della specifica destinazione d'uso.

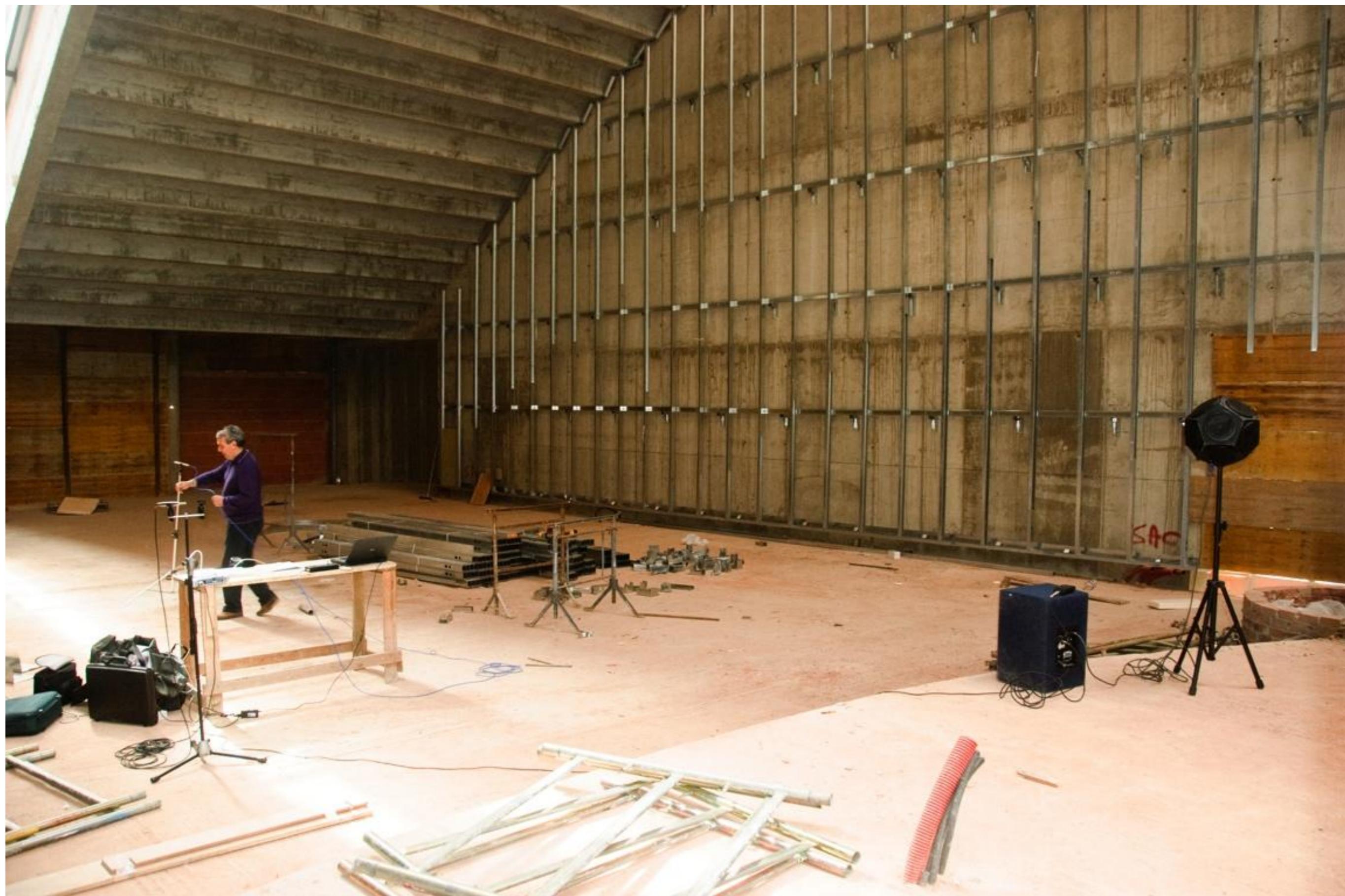
4. Casi studio con soluzioni, tecnologie e materiali

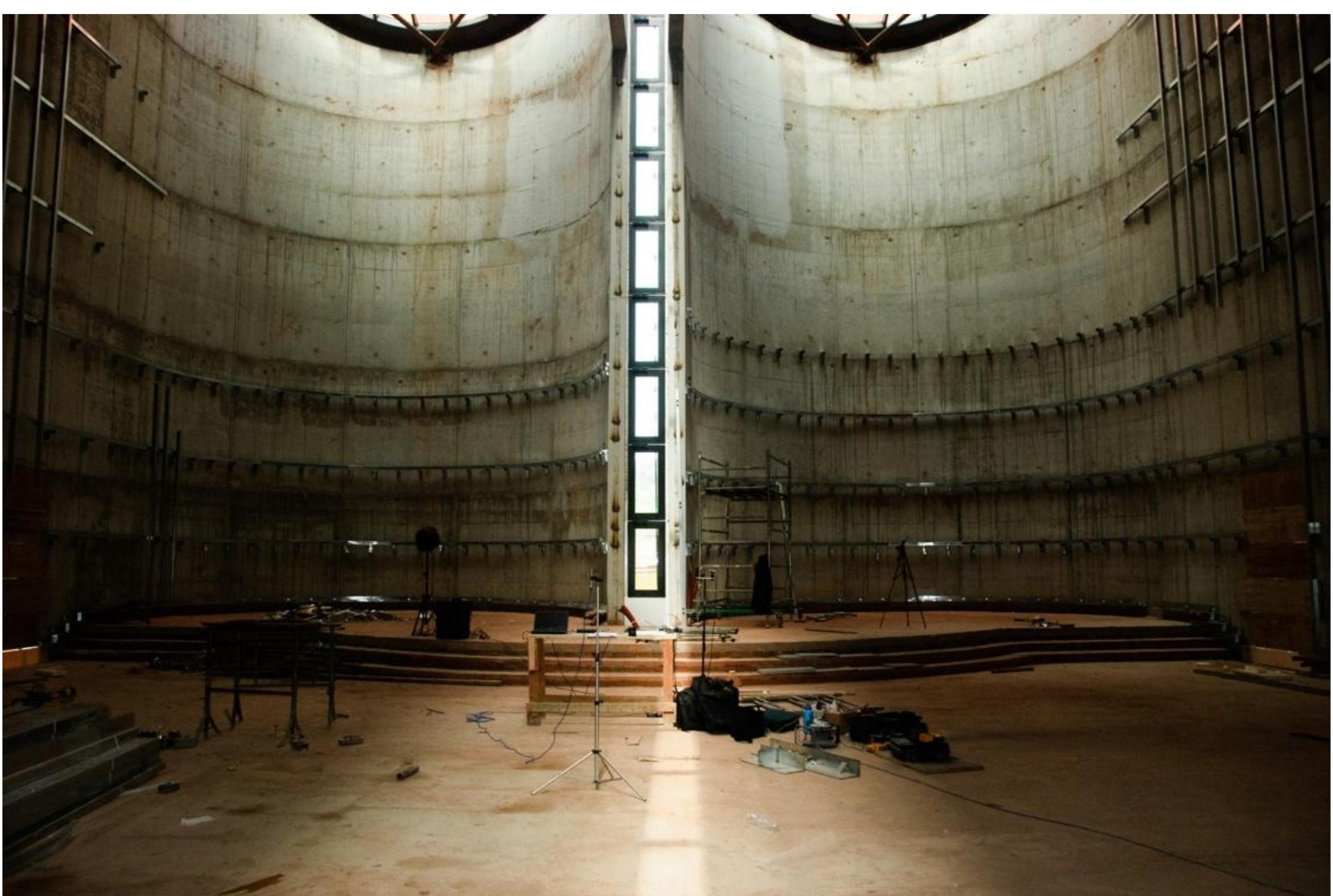


3.5 CASO STUDIO: Chiesa di Terranuova Bracciolini - Mario Botta

Come fare assorbimento acustico?!?
Slat Absorber.

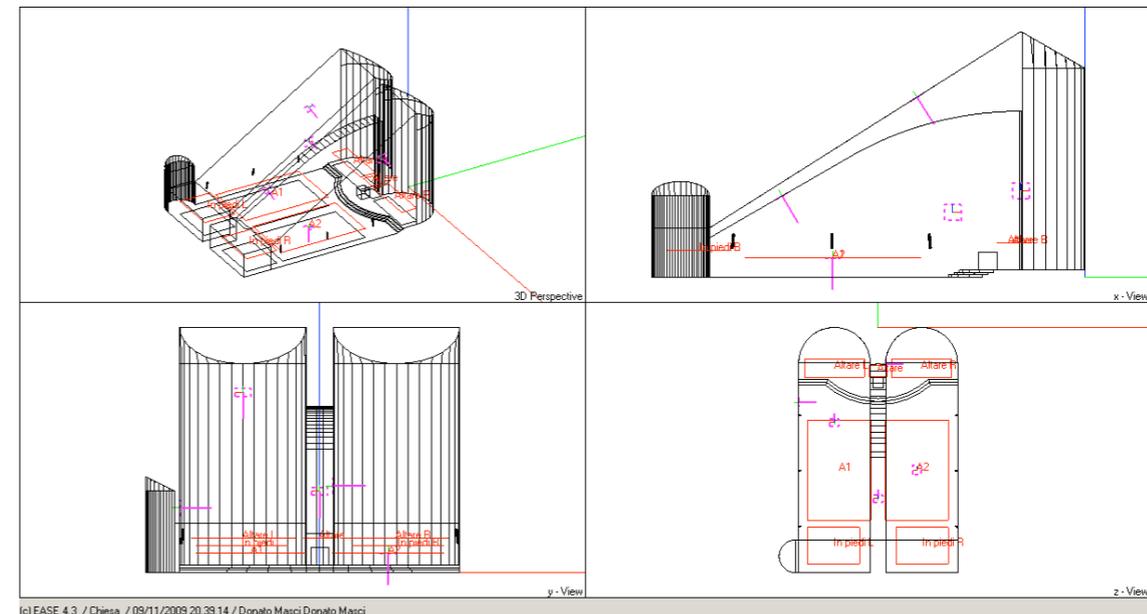
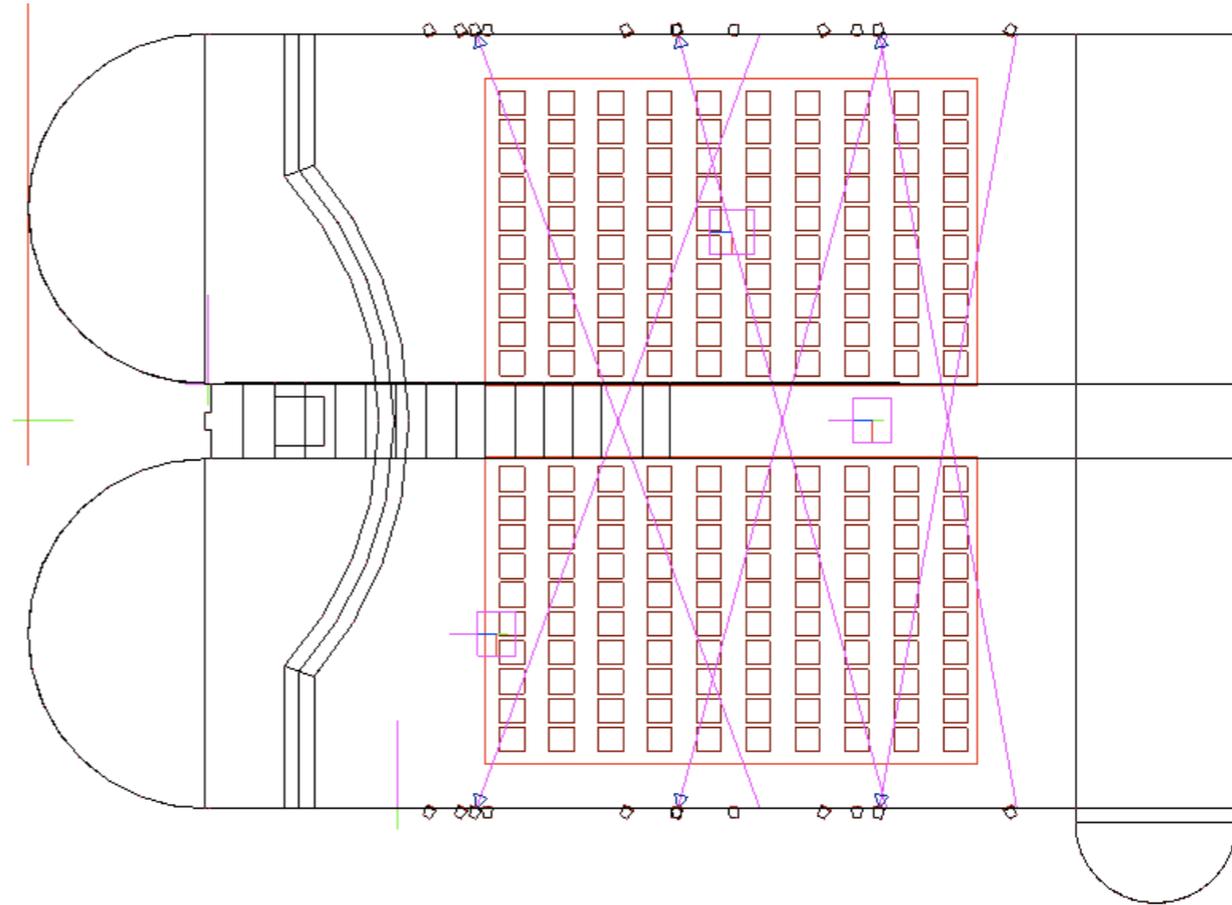
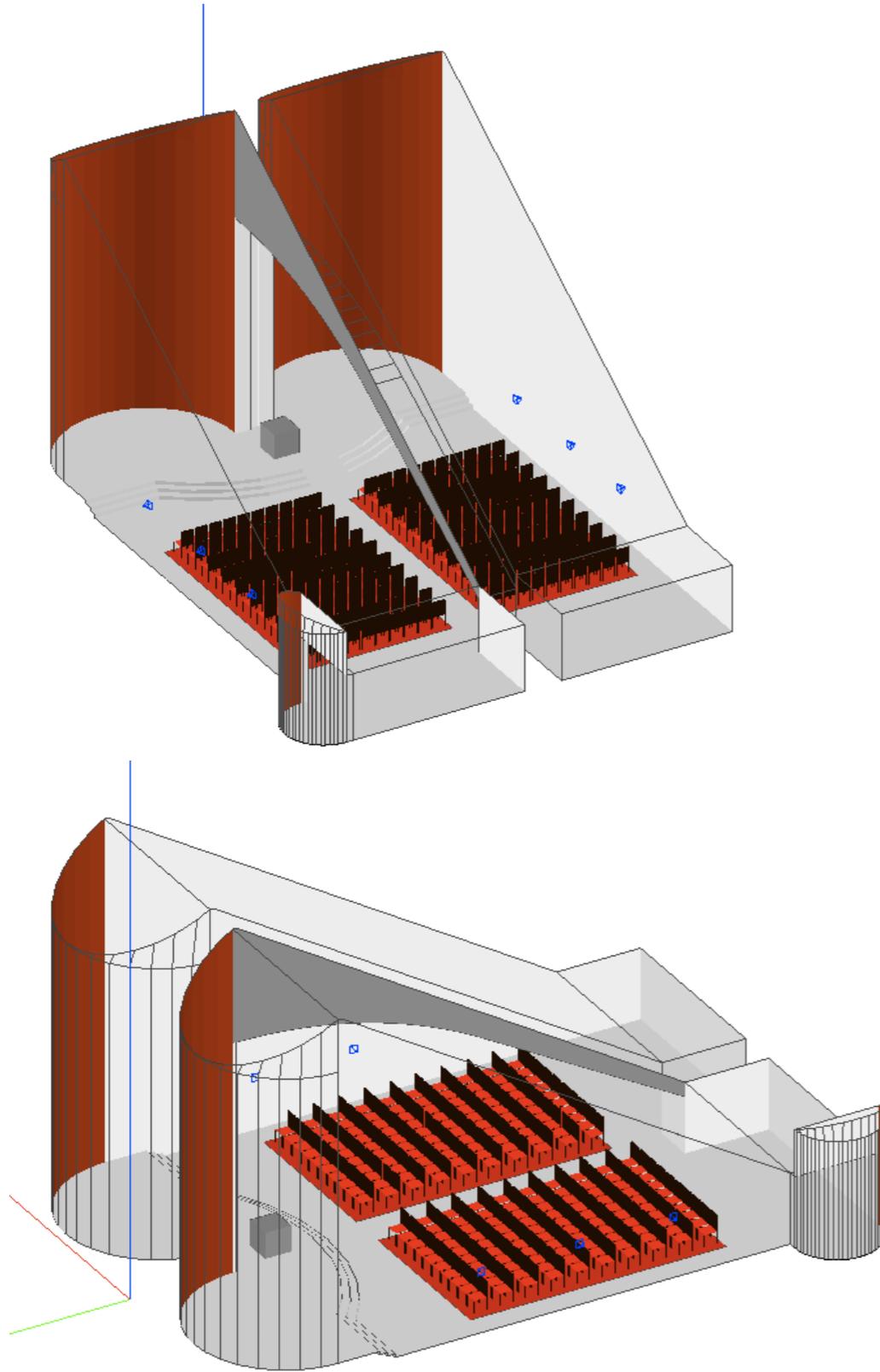






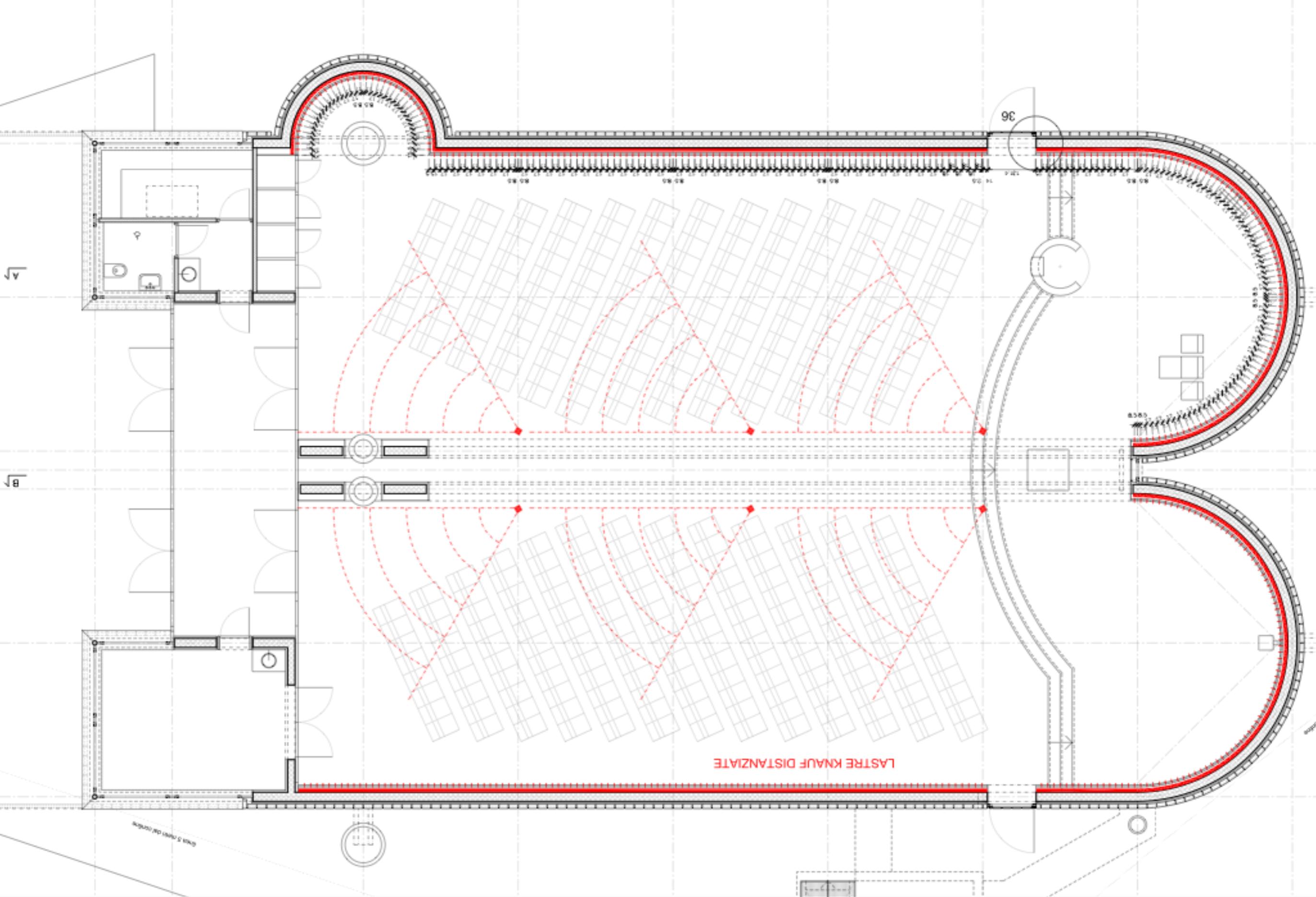


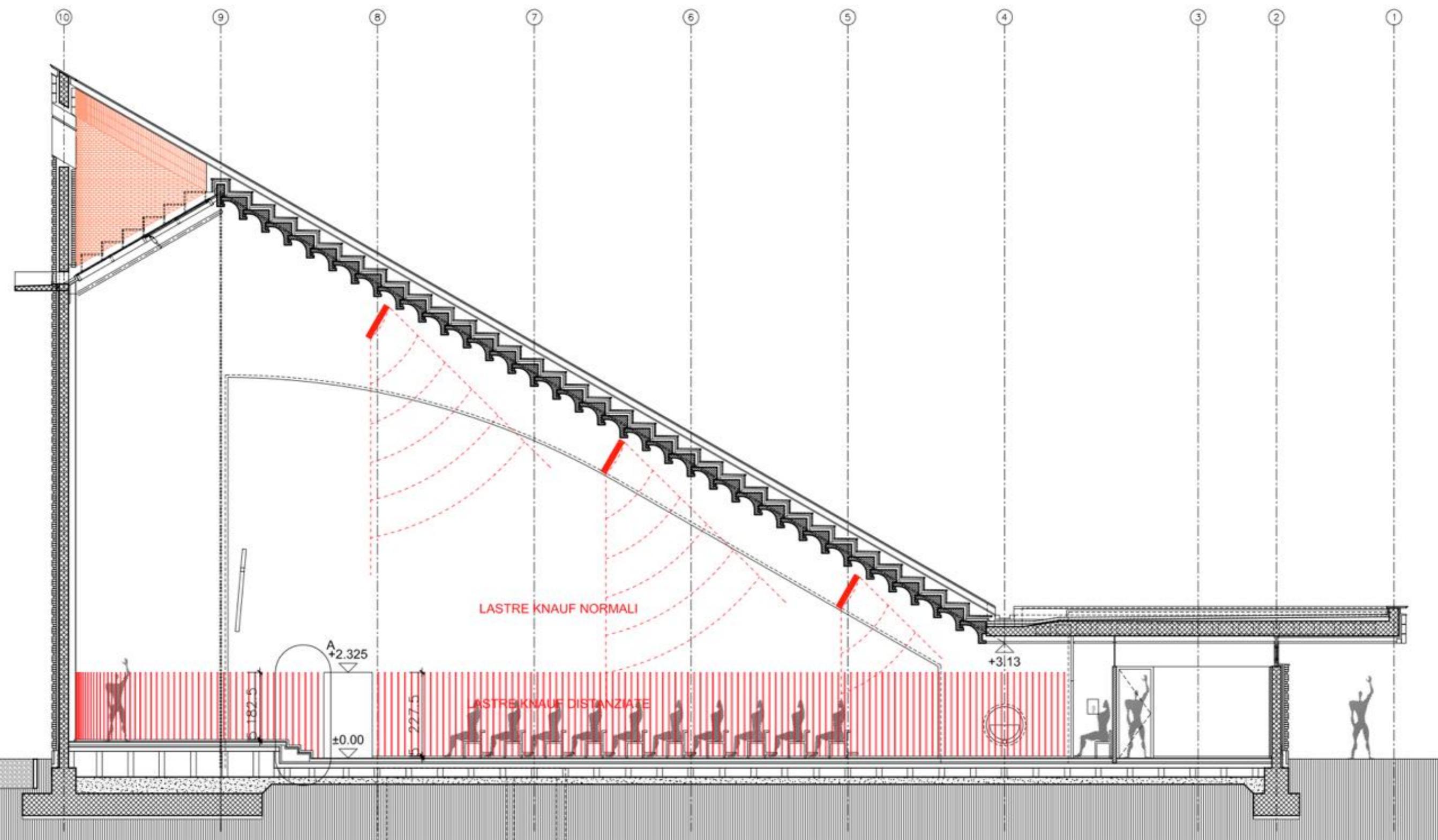
Studio al CAD acustico (EASE)

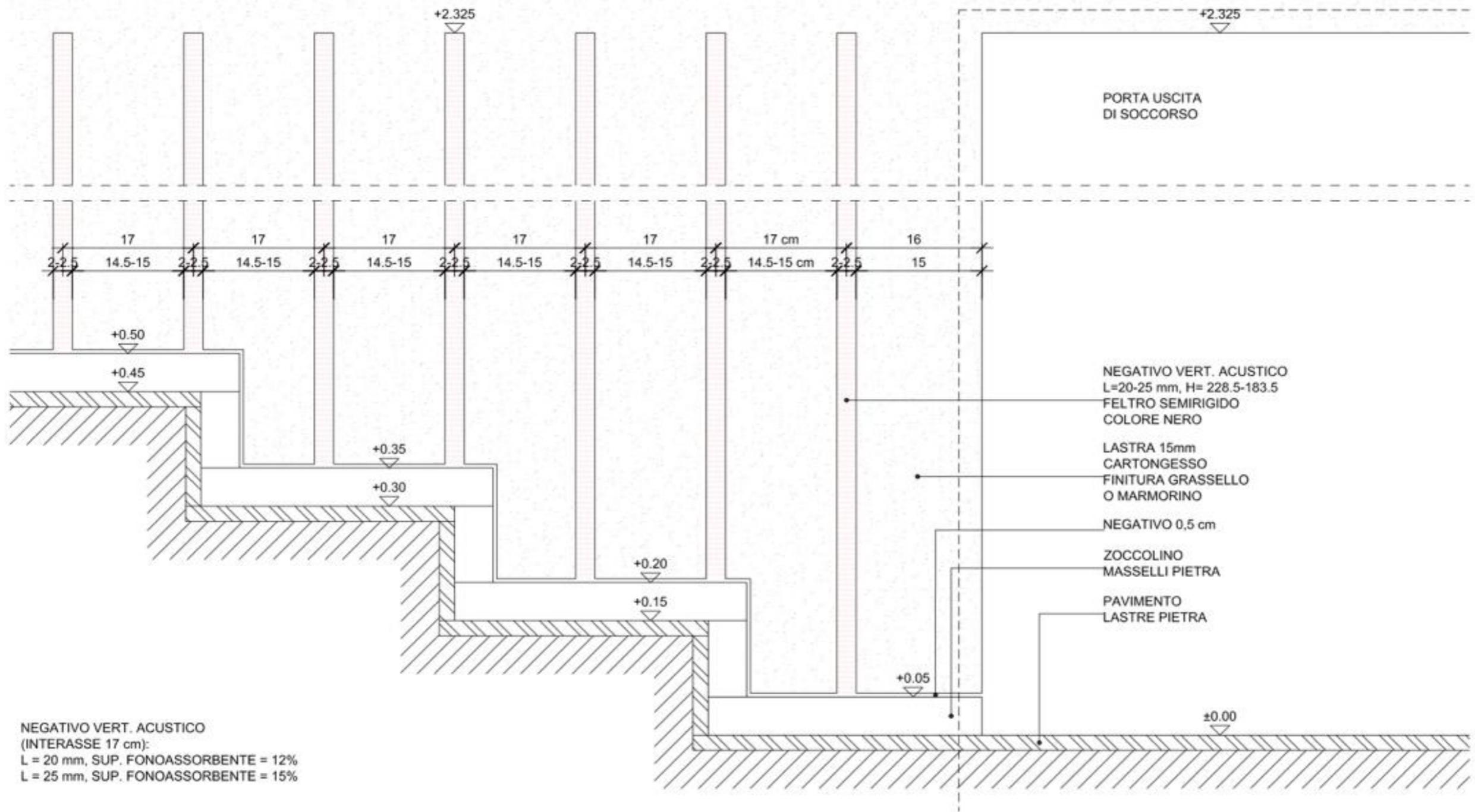


(c) EASE 4.3 / Chiesa / 09/11/2009 20.39.14 / Donato Masci Donato Masci







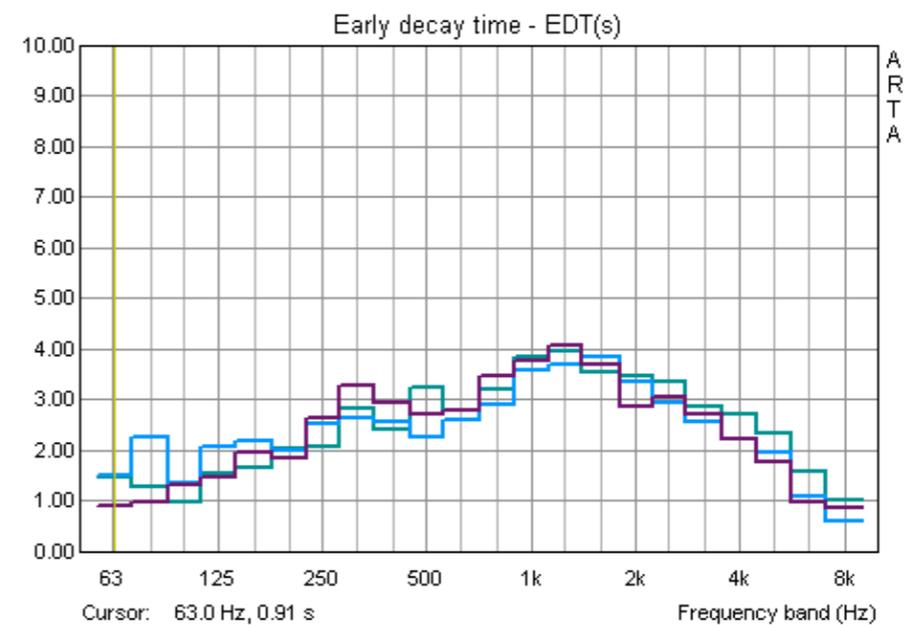
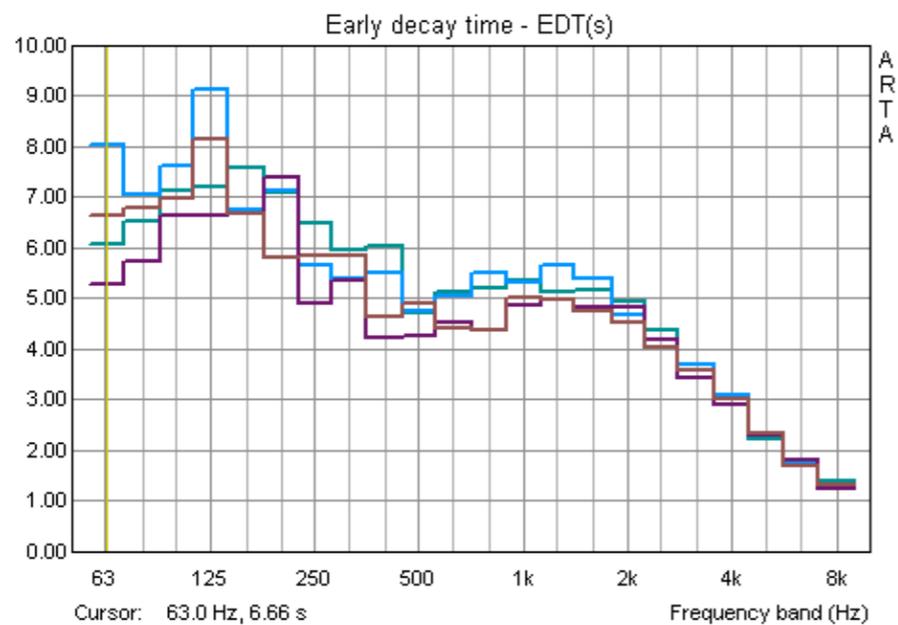
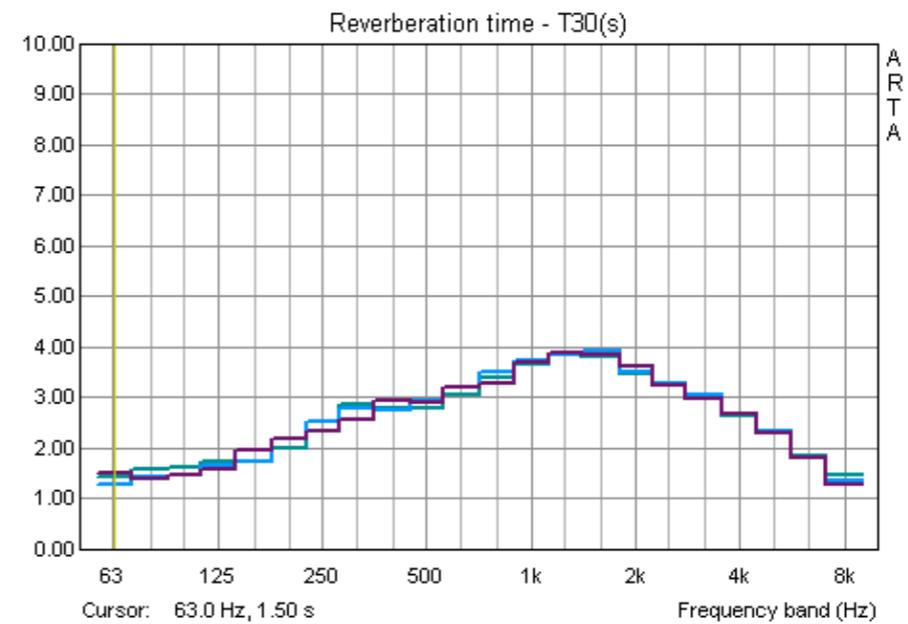
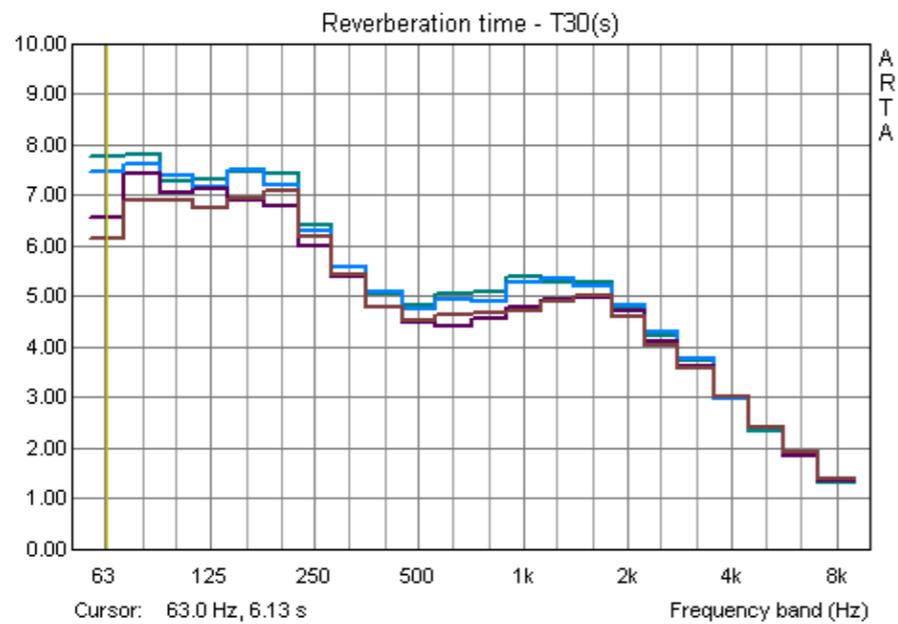


DETT. 36

PROSPETTO 1:5



Risultati finali

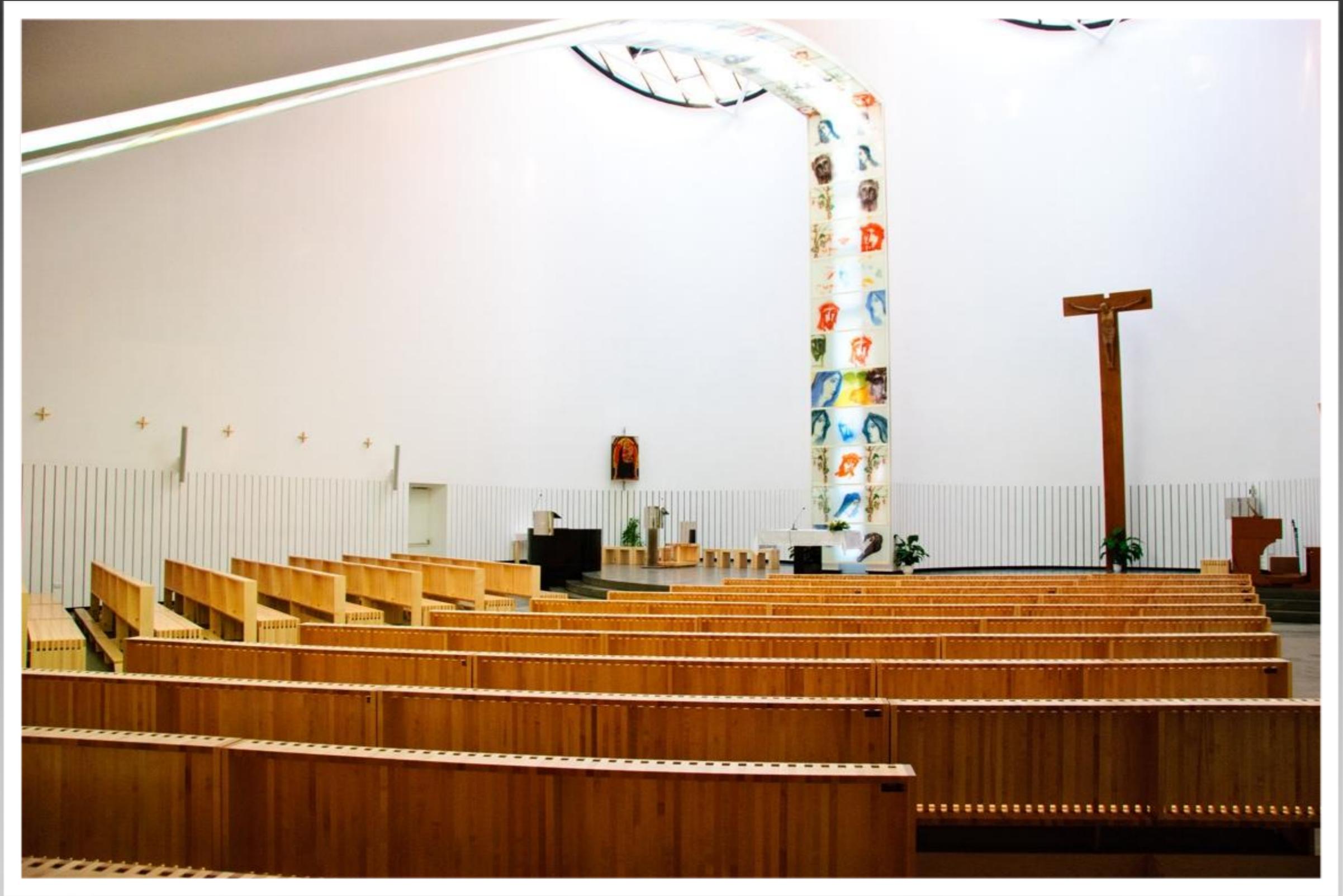


Risultati finali

parametro	STI - Intelligibilità del parlato <i>(i diversi istogrammi sullo stesso grafico sono relativi a punti di misura differenti)</i>			
	Misura <i>ante-operam</i> prima del trattamento acustico	Voce Maschile	0,28	0,31
	Voce Femminile	0,30	0,32	0,32
	Rating	BAD	BAD	BAD
Misura <i>post-operam</i> (27 Ottobre 2010) con il dodecaedro, senza pubblico	Voce Maschile	0,41	0,34	0,38
	Voce Femminile	0,41	0,34	0,38
	Rating	POOR	POOR	POOR
Misura <i>post-operam</i> (27 Ottobre 2010) con l'impianto audio della chiesa, senza pubblico	Voce Maschile	0,52	0,54	0,57
	Voce Femminile	0,53	0,55	0,58
	Rating	FAIR	FAIR	FAIR



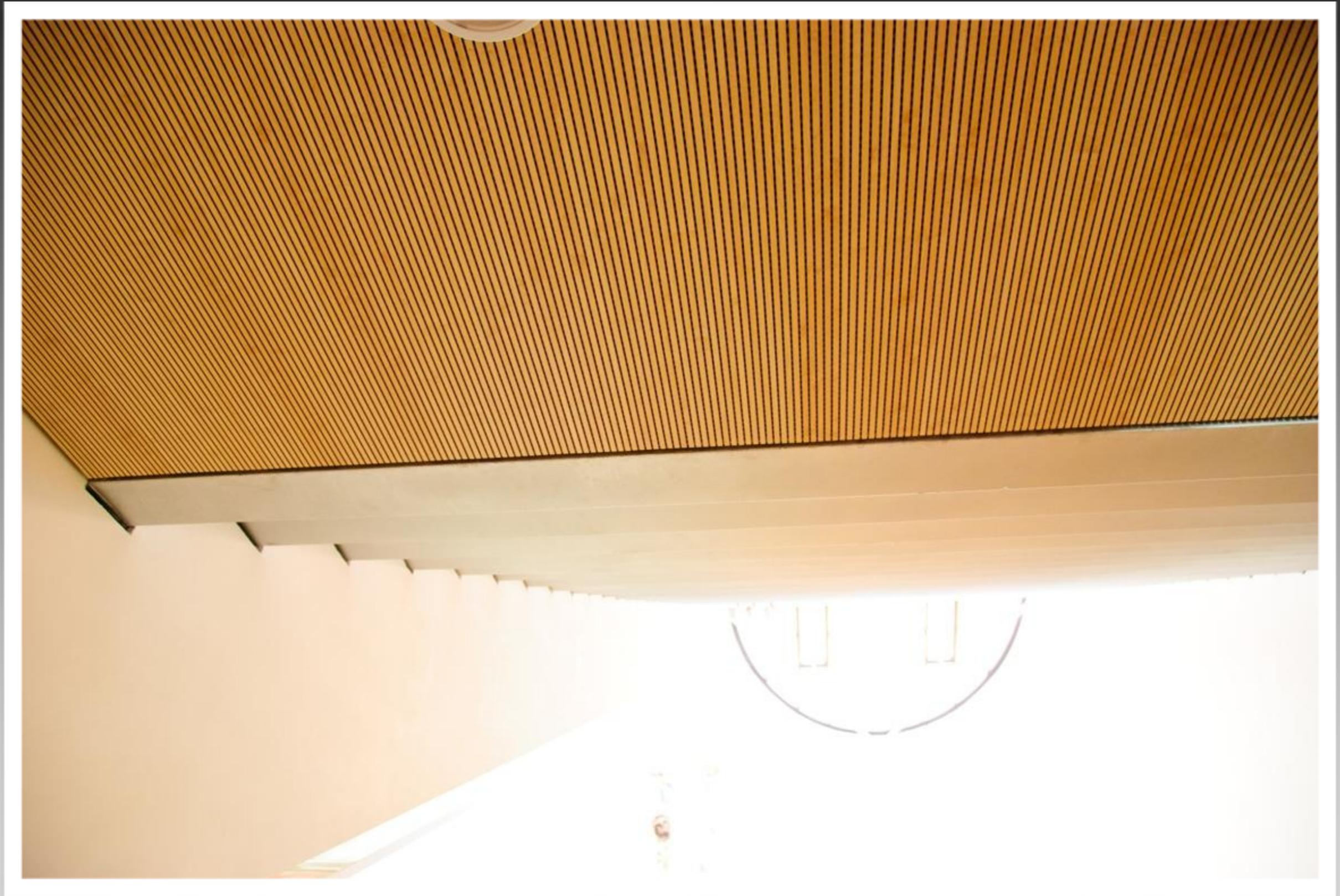
Chiesa di Santa Maria Nuova @ Terranuova Br. (AR)



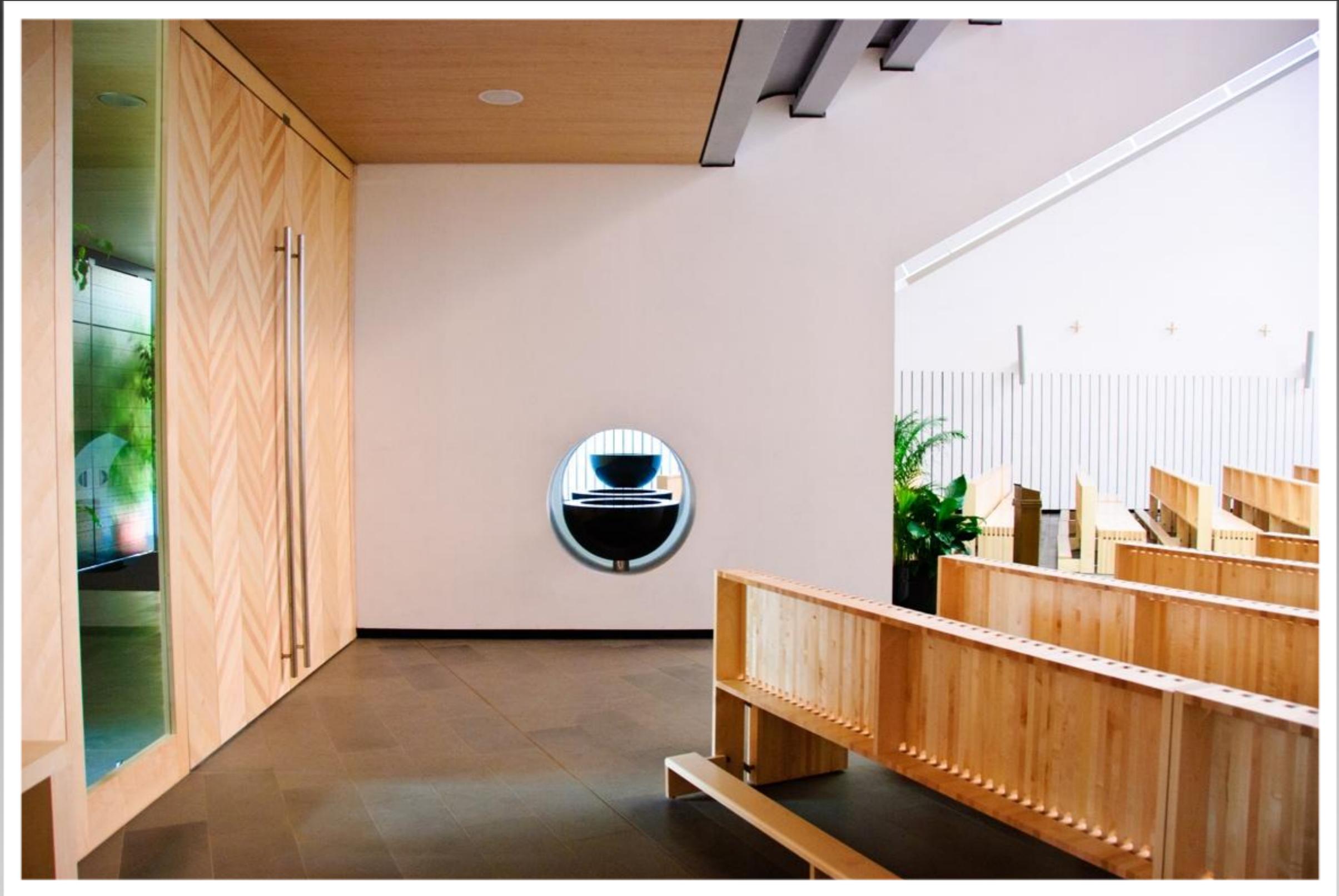
Chiesa di Santa Maria Nuova @ Terranuova Br. (AR)



Chiesa di Santa Maria Nuova @ Terranuova Br. (AR)



Chiesa di Santa Maria Nuova @ Terranuova Br. (AR)



Bibliografia

- Donato Masci: "Parametri Fisici dell'Acustica Ambientale" thesis in Physics;
- L. Busa, G. Cellai, S. Secchi: "Isolamento acustico di facciata delle scuole risultati sperimentali e proposta di criteri di intervento" AIA 42° convegno nazionale 16-17 Luglio 2015;
- Angelo Farina: "La caratterizzazione acustica delle sale da spettacolo con particolare attenzione alle esigenze di ascolto della musica sinfonica" Tesi di Dottorato di Ricerca in Fisica Tecnica;
- Angelo Farina: "Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique", 110th AES Convention, February 2000;
- David Egan: "Architectural Acoustics";
- Leo Beranek: "Concert Halls and Opera Houses - Music, Acoustics, and Architecture" 2nd ed.;
- L.E. Kinsler: "Fundamentals of Acoustics" 4th ed.;
- Yoichi Ando: "Architectural Acoustics";
- T.J. Cox, P. D'Antonio: "Acoustic Absorbers and Diffusers - Theory, design and application" 2nd ed.;
- Marshall Long: "Architectural Acoustics";
- Carmine Ianniello: "L'acustica degli auditorî: arte, scienza o mito? I tempi dei teatri greci e romani";
- Acustica delle Sale: dalla progettazione alla verifica (Scuola di Acustica di Ferrara, Università di Ferrara);
- UNI 11367:2010 "Classificazione acustica delle unità immobiliari";
- UNI 11532:2014 "Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati";
- DPCM 05/12/97 "Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici".

