

Ottimizzazione del comfort acustico nelle Chiese



Vicenza, 17/02/2019



Marco Trame

Ingegnere Elettronico

Progettista di impianti Audio-Video-Controllo (AVC)

Tecnico Competente in Acustica

Specializzato in acustica architettonica

Consulente per Decima 1948, Fantoni, Manens-TIFS, 3P Technologies, Thetis



ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI VENEZIA



ARGOMENTI:

- 1. Principali indici di caratterizzazione acustica**
- 2. Proprietà acustiche dei materiali**
- 3. Esigenze acustiche delle Liturgia**
- 4. Impianto di diffusione sonora**
- 5. Caso di studio: il Tempio Votivo del Lido di Venezia**



Fonte: «La progettazione acustica delle Chiese», 2014 Cirillo, Martellotta, Berardi a cura della CEI

PROPAGAZIONE DEL SUONO IN UN AMBIENTE CONFINATO

Il decadimento del suono in un ambiente chiuso dipende dalle proprietà **assorbenti**, **riflettenti e diffondenti** delle superfici che lo costituiscono (muri, pavimenti, oggetti, persone)

D= suono diretto

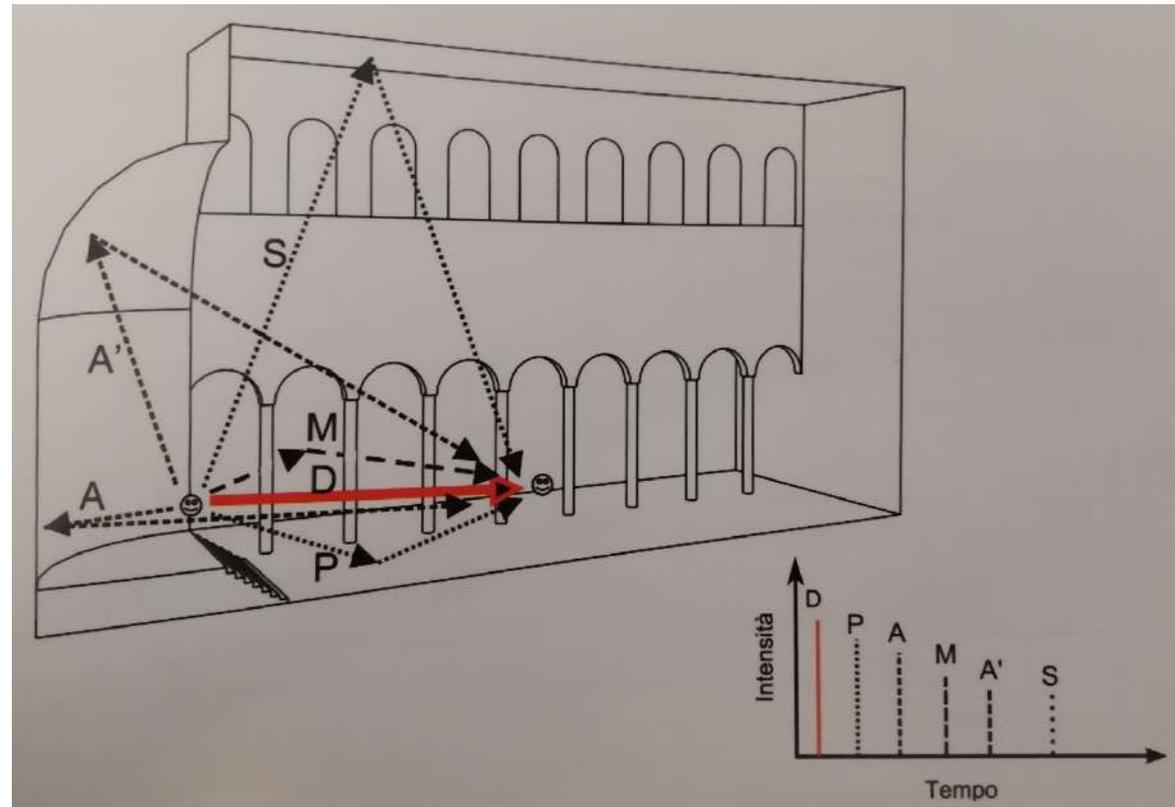
P= riflessione sul pavimento

A= riflessione sulla parete dell'abside

M= riflessione sulla parete della navata laterale

A'= riflessione sulla cupola dell'abside

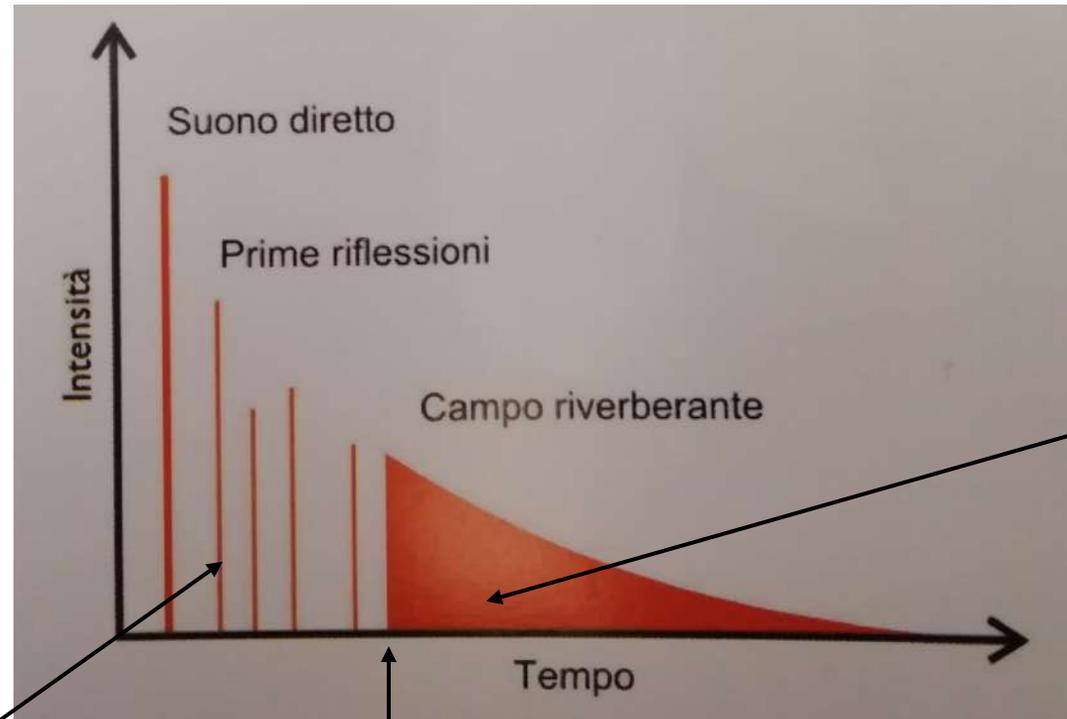
S= riflessione sul soffitto



PROPAGAZIONE DEL SUONO IN UN AMBIENTE CONFINATO

Principio della fusione temporale:
l'orecchio non riesce a distinguere separatamente suoni che si verificano molto ravvicinati nel tempo

Riflessioni **utili** ai fini della chiarezza del suono



Riflessioni **dannose** in quanto tendono a sovrapporsi al segnale iniziale, diminuendo la chiarezza e l'intelligibilità

PRINCIPALI INDICI DI CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

TEMPO DI RIVERBERAZIONE
(**RT60, T30, T20, T10, EDT**)

PARLATO

Indice di trasmissione del parlato (**STI**)
Chiarezza del parlato (**C50**)
Indice di Definizione (**D**)
Indice di perdita di articolazione delle
consonanti (**Alcons**)

SPAZIALITÀ

Tempo di ritardo iniziale (**Δt_i**)
Frazione laterale di energia (**LF, LLF**)
Coefficiente di correlazione mutua
inter-aurale (**IACC**)

MUSICA

Chiarezza musicale (**C80**)
Rapporto dei bassi (**BR**)
Brillantezza (**BRILLIANCE**)

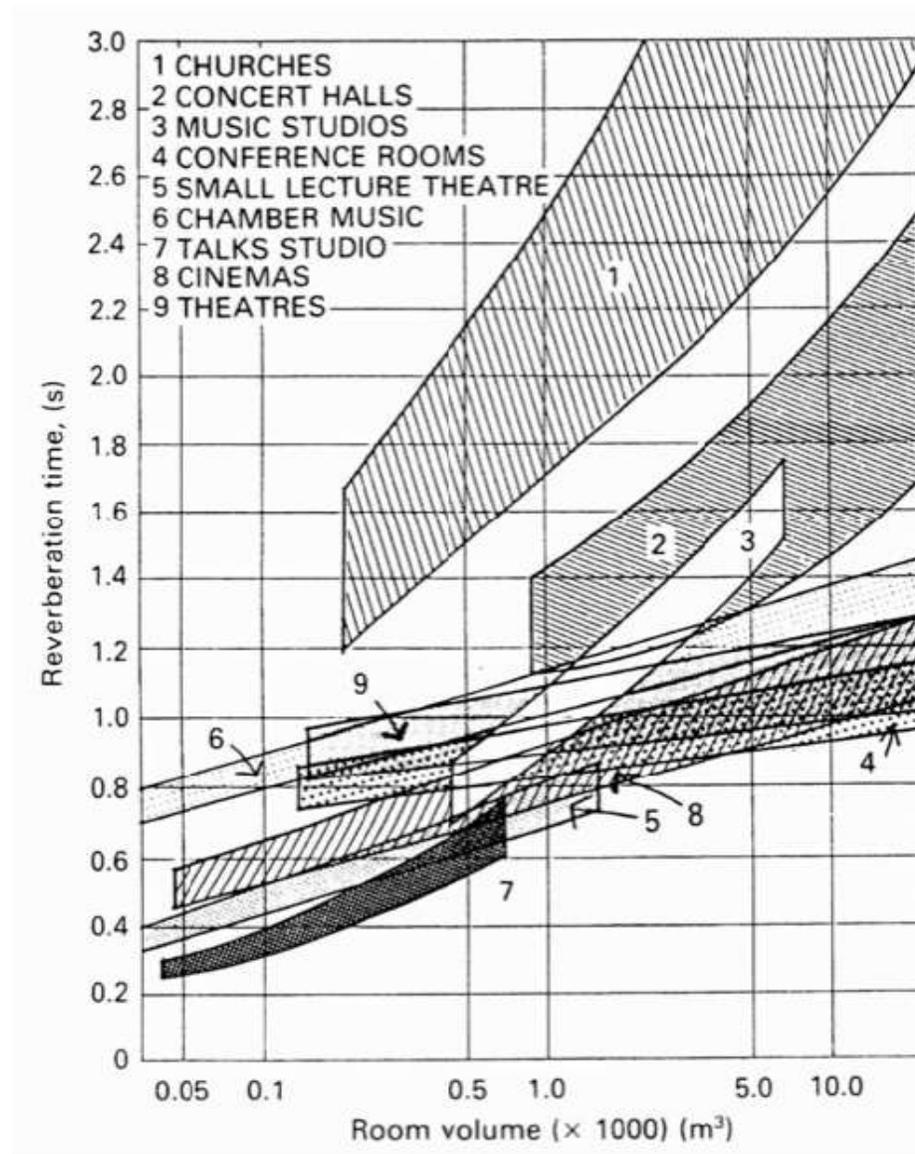
TEMPO DI RIVERBERAZIONE

- L'indice più importante per caratterizzare l'acustica di un ambiente è il tempo di riverberazione (**RT60**). Introdotto da Wallace Clement Sabine
- È dovuto alla riflessione multipla del suono ai confini dell'edificio e sugli oggetti presenti, e produce una più o meno lunga permanenza del suono nell'ambiente.
- Dipende da 2 caratteristiche fondamentali:
 - Volume dell'ambiente
 - Assorbimento acustico delle superfici che delimitano l'ambiente



$$RT_{60} = 0,16 \cdot V / (\sum \alpha_i S_i + \sum A_{Ni})$$

È un **descrittore acustico globale** in quanto è indipendente dalla posizione di misura (non sempre!)



È importante considerare anche la **destinazione d'uso** dell'ambiente e il **tipo di segnale sonoro**



Basilica di
Santo Spirito
a Firenze:
RT60=11,6s



Una forte riverberazione sonora comporta tempi di riverberazione lunghi, dell'ordine di parecchi secondi, e coincide con grandi volumi oltre che con l'impiego nella costruzione degli edifici di materiali acusticamente riflettenti, quali marmi, pietre e intonaci.



Camera
anecoica
Università di
Ferrara:
RT60 \approx 0s



Una scarsa riverberazione sonora comporta tempi di riverberazione ridotti, dell'ordine di pochi decimi di secondo, e coincide con piccoli volumi oltre che con l'impiego nella costruzione degli edifici di materiali acusticamente assorbenti, quali tessuti, tappeti, pannelli porosi, ecc.

RAPPORTO DEI BASSI

- Indicatore acustico utile per la valutazione della qualità di ascolto della **musica strumentale e corale**
- Misura il **bilanciamento tonale** alle basse frequenze
- **$BR = RT_{\downarrow 125Hz} + RT_{\downarrow 250Hz} / RT_{\downarrow 500Hz} + RT_{\downarrow 1000Hz}$**
- Deve essere valutato in condizioni di **piena occupazione**
- **$BR_{\downarrow ott} = 1,20$**

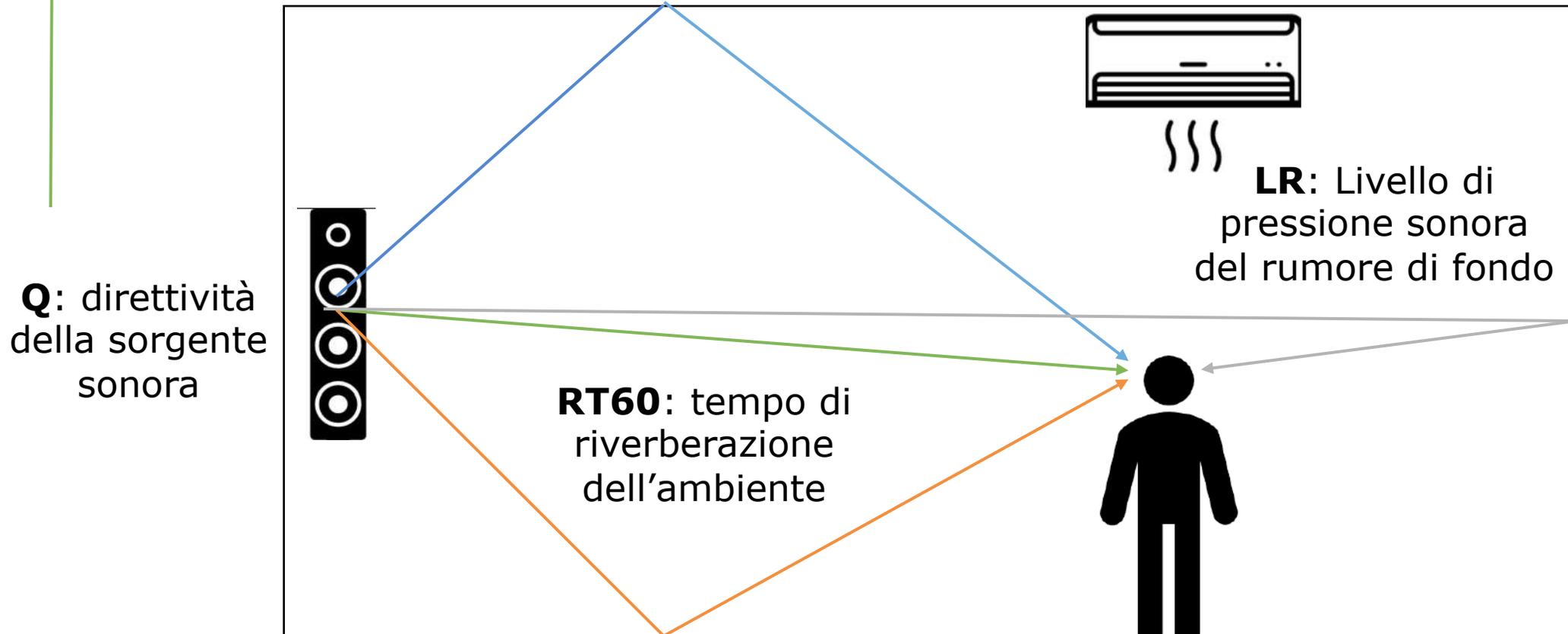
PRINCIPALI INDICI DI CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA

Indice di trasmissione del parlato

- L'esigenza fondamentale nella comunicazione verbale è la **comprensione corretta del messaggio trasmesso**.
- Si misura considerando **il parlato come un segnale modulato in frequenza nelle sette bande di ottava da 125Hz a 8kHz** ed è dato dal rapporto tra il segnale originale e quello modulato
- **Assume valori tra 0 e 1** a cui corrisponde una valutazione qualitativa delle condizioni di intelligibilità

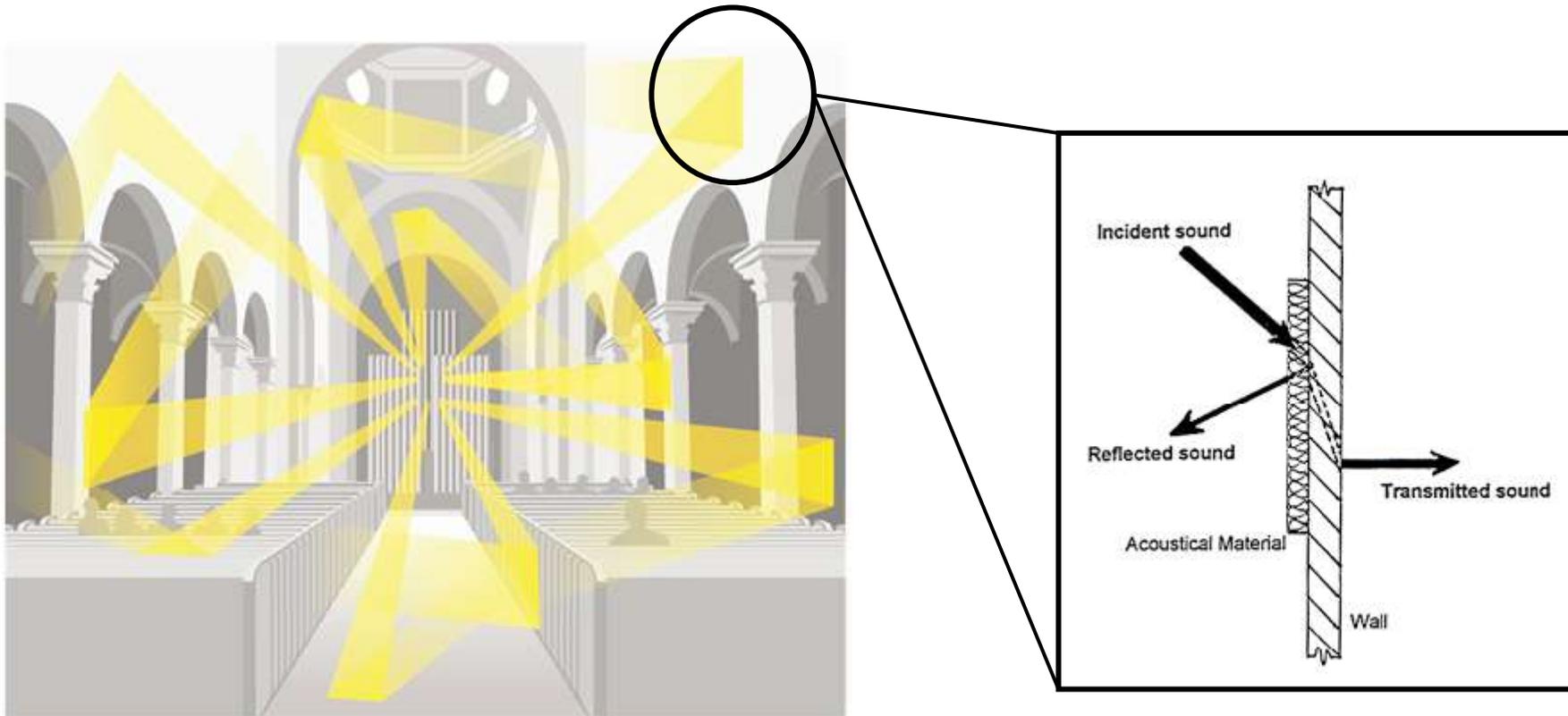
Intelligibility rating ^a	Sentence score ^b %	Meaningful PB-word score ^c %	CVC _{EQB} -non-sensical word score %	STI ^d	SIL ^d dB	SII ^e
Excellent	100	> 98	> 81	> 0,75	21	—
Good	100	93 to 98	70 to 81	0,60 to 0,75	15 to 21	> 0,75
Fair	100	80 to 93	53 to 70	0,45 to 0,60	10 to 15	—
Poor	70 to 100	60 to 80	31 to 53	0,30 to 0,45	3 to 10	< 0,45
Bad	< 70	< 60	< 31	< 0,30	< 3	—

- È un **descrittore acustico locale** in quanto è legato alla posizione di misura. È dipendente da 3 parametri fondamentali:



PROPRIETÀ ACUSTICHE DEI MATERIALI

- Il **grado di assorbimento acustico dei materiali** e la loro **posizione** influenza il rafforzamento e l'indebolimento del suono, la durata del tempo di riverberazione, l'intelligibilità del parlato, il buon ascolto della musica, ecc.



PROPRIETÀ ACUSTICHE DEI MATERIALI

- Ogni materiale è caratterizzato da una serie di **coefficienti di assorbimento acustico** che rappresentano il rapporto tra l'energia assorbita e l'energia incidente sulla superficie.
- L'assorbimento del suono è dovuto ad un fenomeno dissipativo: **l'energia sonora incidente viene trasformata in energia termica e dissipata all'interno del materiale**
- A seconda del meccanismo di dissipazione i materiali si classificano in:

1) Materiali fibrosi e porosi

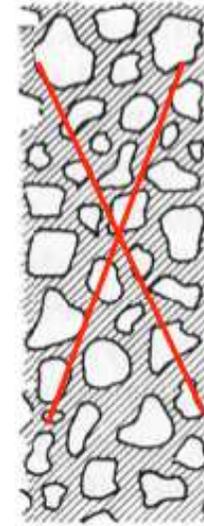
2) Risuonatori acustici

3) Pannelli e membrane vibranti

MATERIALI FIBROSI E POROSI

- Contengono una **elevata percentuale d'aria** interconnessa al proprio interno e in collegamento con l'ambiente esterno.
- Devono essere a **celle aperte!**
- La dissipazione avviene per **attrito viscoso e scambio termico** sulle pareti della struttura stessa del materiale
- **Materiali fibrosi:** lana di vetro, lana di roccia, fibra di poliestere, feltri, fibre vegetali (cotone, canapa, cocco, legno, cellulosa etc), fibre animali (lana, piuma d'oca etc)
- **Materiali porosi:** poliuretani espansi a cella aperta, resina melamminica, schiuma espansa a base di polietilene, schiume di alluminio

SI



NO

Esempio:
Polietilene,
poliuretani a cella
chiusa, polistirolo

MATERIALI FIBROSI E POROSI



Arazzo sospeso.
Cattedrale di Santa Maria Assunta, Como

MATERIALI FIBROSI E POROSI



Banchi in legno con sedile e schienale imbottiti e rivestiti in tessuto, Caloi.
Chiesa di Saint Martin, Amilly - Francia

MATERIALI FIBROSI E POROSI



Tendaggi drappeggiati in velluto.
Duomo di San Giorgio, Ragusa

RISUONATORI ACUSTICI

- Si basano sul principio della **risonanza di Helmholtz**: in una cavità collegata all'esterno tramite un'apertura (collo), il suono incidente fa vibrare la massa d'aria all'interno dell'apertura, **per l'attrito viscoso, l'energia viene dissipata calore.**
- **L'assorbimento del suono è piuttosto selettivo** alla frequenza di risonanza del sistema. Può essere esteso in frequenza inserendo del materiale fibroso all'interno del collo oppure nella cavità
- In commercio esistono diversi pannelli forati o fresati, il cui comportamento acustico è assimilabile ad una **struttura formata da n risuonatori di Helmholtz**



RISUONATORI ACUSTICI



Rivestimento a parete in 4Akustik, Fantoni.
Duomo di San Giorgio, Udine

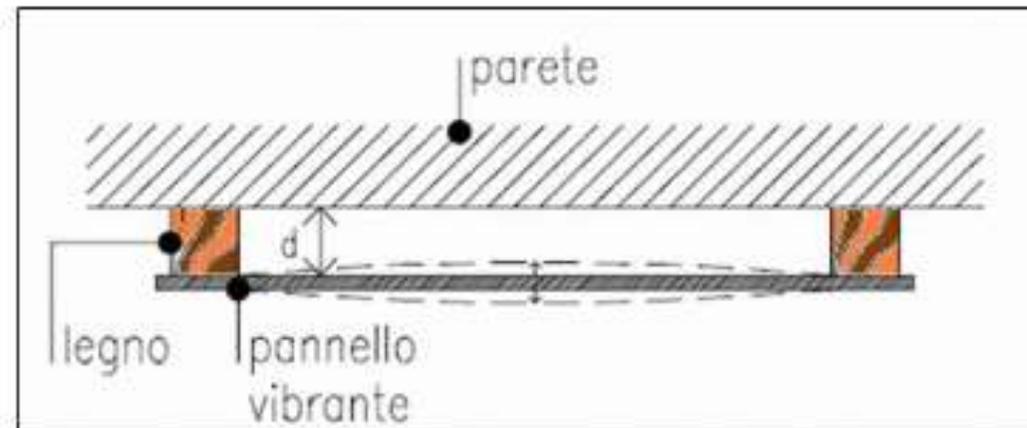
RISUONATORI ACUSTICI



Rivestimento delle volte in 4Akustik, Fantoni.
Chiesa di Ovedo, Pordenone

PANNELLI E MEMBRANE VIBRANTI

- Sono costituiti da **lastre di materiale non poroso (come legno, vetro, cartongesso)** montato su un telaio ad una certa distanza dalle superfici rigide retrostanti in modo da creare un'intercapedine d'aria.
- L'energia sonora incidente sul pannello viene dissipata in calore nella **flessione delle fibre che lo compongono**
- Analogamente ai risuonatori si tratta di un **sistema massa-molla-massa** che permette un assorbimento selettivo alla frequenza di risonanza. L'assorbimento può essere esteso in frequenza inserendo del materiale fibroso all'interno dell'intercapedine



PANNELLI E MEMBRANE VIBRANTI



Parete del presbiterio in cartongesso singola lastra con lana di roccia.
Chiesa di Cimavilla (TV)

ing.Marco Trame – ingmarcotrame@gmail.com – cel. +39 3402240805

PANNELLI E MEMBRANE VIBRANTI



Parte della grande vetrata istoriata a piombo di fine Quattrocento
Basilica di San Giovanni e Paolo, Venezia

ESIGENZE ACUSTICHE DELLA LITURGIA

- Le esigenze acustiche della liturgia sono molteplici e hanno subito una **continua evoluzione** nel corso de secoli.
- Negli ultimi anni, l'acustica di una chiesa, in linea con le indicazioni del **Concilio Vaticano II (1965)**, ha posto più attenzione all'**importanza della parola**.



A livello di progetto e restauro sono stati fatti numerosi sforzi per **ridurre la riverberazione** al fine di migliorare l'intelligibilità del parlato.

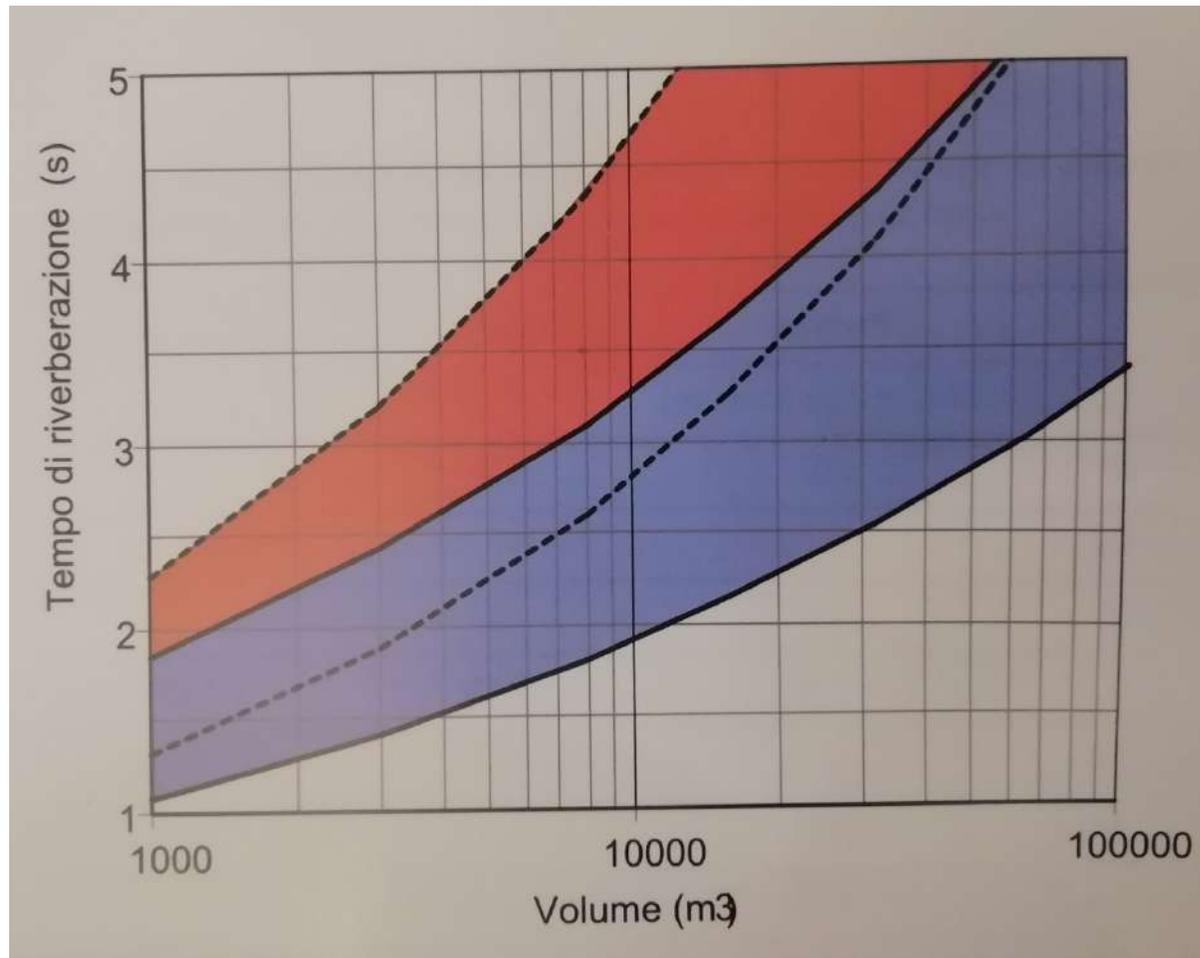
- Tuttavia la celebrazione della Messa **si compone di diverse parti** (parlate e musicali) ciascuna delle quali necessiterebbe di condizioni acustiche ideali.
- Bisogna trovare il **giusto compromesso** tra una buona intellegibilità della parola e le condizioni più idonee per il canto, la musica e la preghiera.

L'equilibrio tra la chiarezza del suono e la trasmissione del senso si sacralità è difficile conseguimento ed è strettamente legato al **concetto di spazio**

RIVERBERAZIONE



Un'aula liturgica piccola, rispetto al numero di fedeli, e molto fonoassorbente verrà istintivamente assimilata ad una sala conferenze



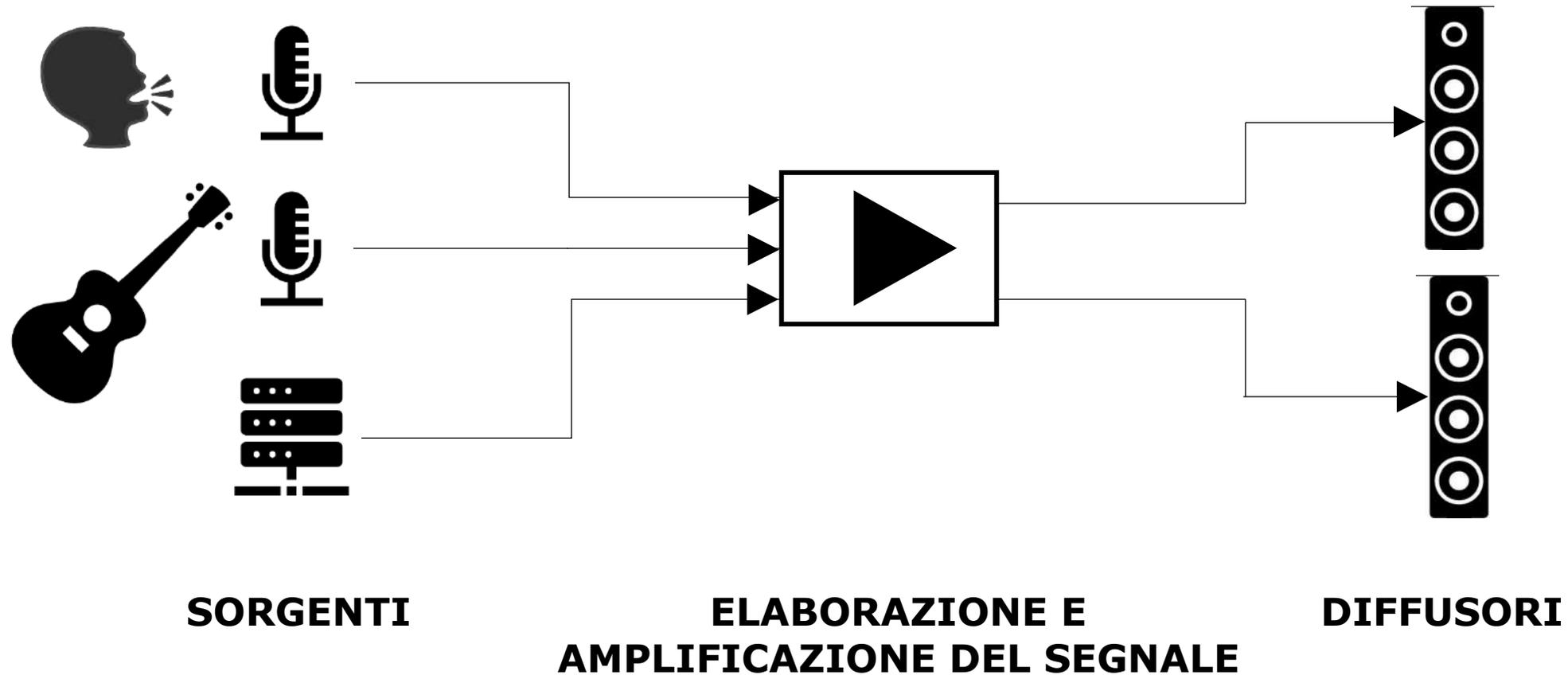
Nelle chiese, diversamente dai teatri in cui l'assorbimento acustico è favorito dall'uso esteso di materiali fonoassorbenti, il tempo di riverberazione dipende dal **grado di occupazione**

Grafico del tempo di riverberazione ottimali in funzione del volume e dell'occupazione.

ROSSO: chiesa vuota – **BLU**: chiesa occupata

IMPIANTO DI DIFFUSIONE SONORA

- L'impianto di diffusione sonora sono costituiti da 3 parti fondamentali:



IMPIANTO DI DIFFUSIONE SONORA

- I **diffusori acustici** rivestono un **ruolo di grande importanza**: la scelta sbagliata del modello può vanificare gli sforzi fatti per contenere il tempo di riverberazione.
- Per caratterizzare i vari diffusori bisogna considerare **diversi parametri**:
 - Risposta in frequenza
 - Sensibilità
 - Livello sonoro massimo
 - Direttività
 - Impedenza
- Si possono dividere in 3 categorie:
 - **Diffusori a cono**
 - **Diffusori a tromba**
 - **Diffusori a colonna**

DIFFUSORI A CONO

- Diametro compreso tra i 10cm e i 20cm
- Sono caratterizzati da **un'efficienza molto bassa** e da una **direttività contenuta** con un angolo di circa **90°** per lunghezze d'onda comparabili con il diametro del cono



Soundtube RS600i

DIFFUSORI A CONO



Diffusori Soundtube RS102i a 3 vie
Chiesa di Saint Andrew, UK

DIFFUSORI A TROMBA

- Sezione dei medio-alti caricata a tromba in modo da guidare il fronte d'onda
- Sono caratterizzati da **un'efficienza alta** e da una **buona direttività** con la possibilità di modificare l'angolo di dispersione cambiando la guida d'onda.



BOSE Roommatch

DIFFUSORI A TROMBA



Diffusori Room match, BOSE
Chiesa di Santa Maria Assunta di Castel del Piano, Perugia
ing.Marco Trame – ingmarcotrame@gmail.com – cel. +39 3402240805

DIFFUSORI A COLONNA

- Composti da una serie di altoparlanti a cono allineati tra loro
- Hanno un'efficienza media e un buon controllo della direttività sul piano verticale
- La minor frequenza controllabile con precisione è legata alla lunghezza dell'array: per poter controllare l'emissione a 125Hz occorre un line array alto 5,40m!
- Esistono 2 tipologie:
 - **Line array passivi**
 - **Line array attivi** con controllo digitale della direttività



BOSE Panaray MA12EX

DIFFUSORI A COLONNA



Line array attivo RCF VSA 2050
Basilica di San Marco, Venezia

CASO DI STUDIO:

**RESTAURO DEL TEMPIO VOTIVO DEL
LIDO DI VENEZIA**

Cenni storici

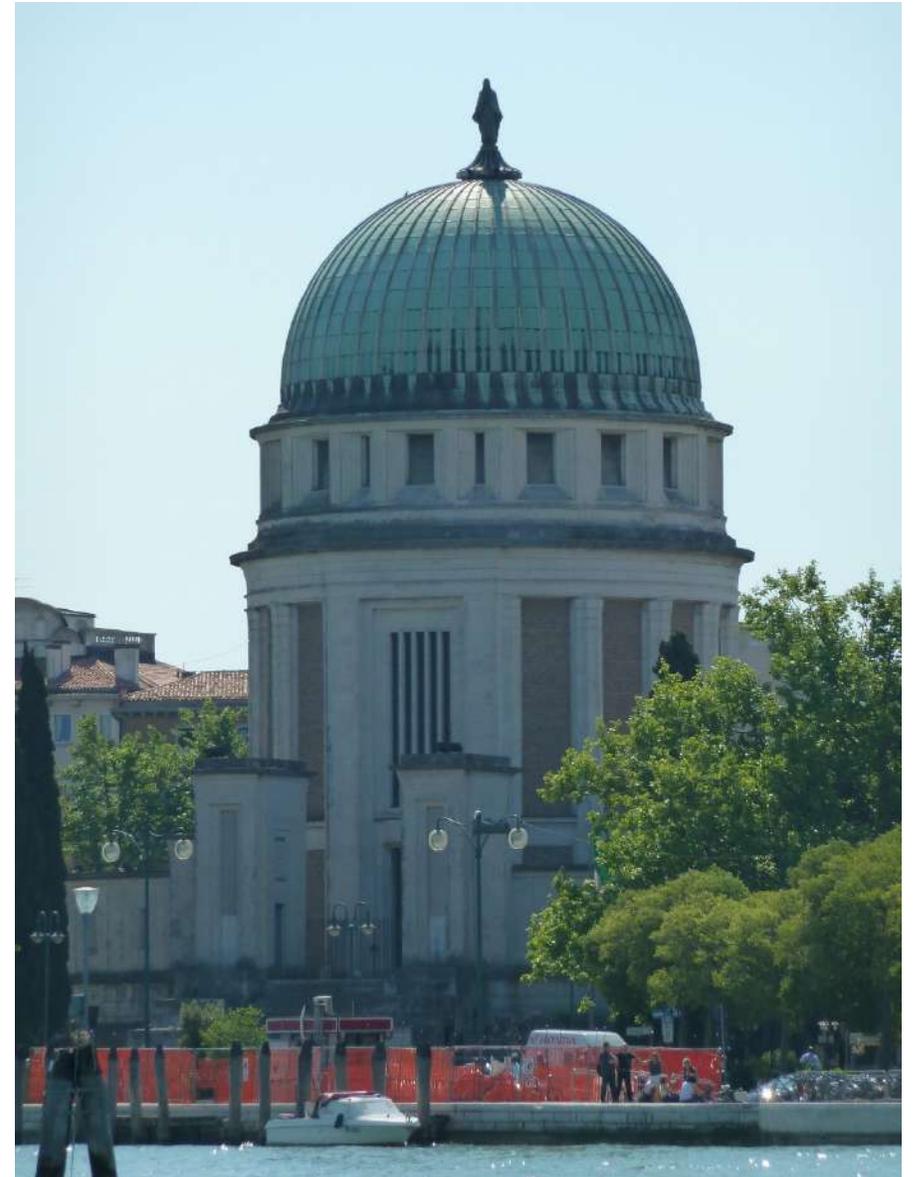
Il Patriarca Pietro La Fontaine nel 1916 fece voto di costruire il Tempio in onore della Madonna affinché proteggesse Venezia

Progetto dell'architetto Torres

Nell'idea iniziale avrebbe dovuto sostituire la vicina chiesa di Santa Maria Elisabetta

Nel 1928 – in corso d'opera - fu deciso di fare del Tempio Votivo un Sacrario Militare

La sala grande e la zona sotto la cupola non furono mai utilizzate. Ad oggi è stata utilizzata solo la cripta dove risiede l'Ossario



Progetto di restauro

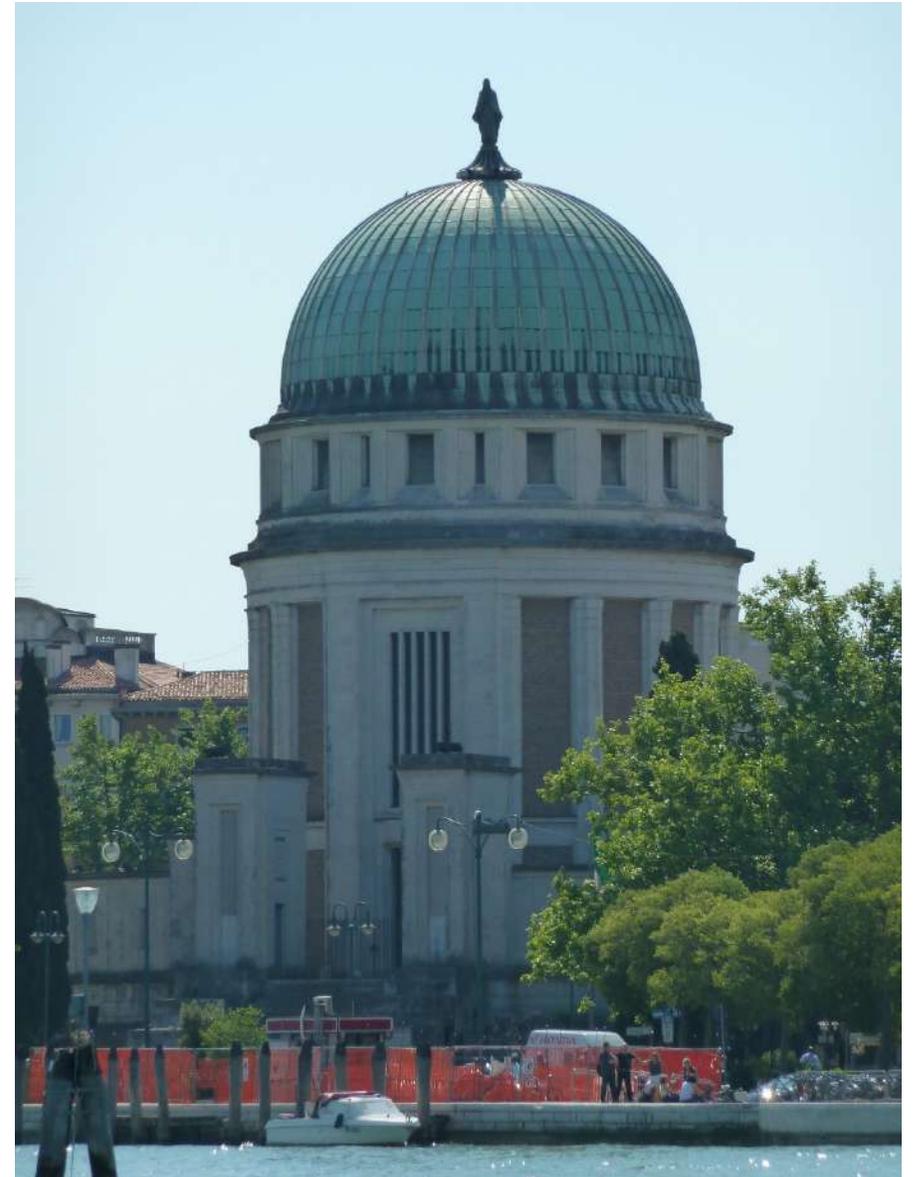
Il Comune di Venezia e il Patriarcato hanno deciso di restaurare l'edificio per farne un museo dedicato alla Prima Guerra Mondiale.

La cripta manterrà la stessa funzione di Sacrario Militare

La sala grande avrà un utilizzo polivalente:

- Sala immersiva con ciclorama (tecnica del videomapping) ed effetti audio
- Funzioni liturgiche

La zona al piano superiore sotto la cupola avrà la funzione di Centro Documentale

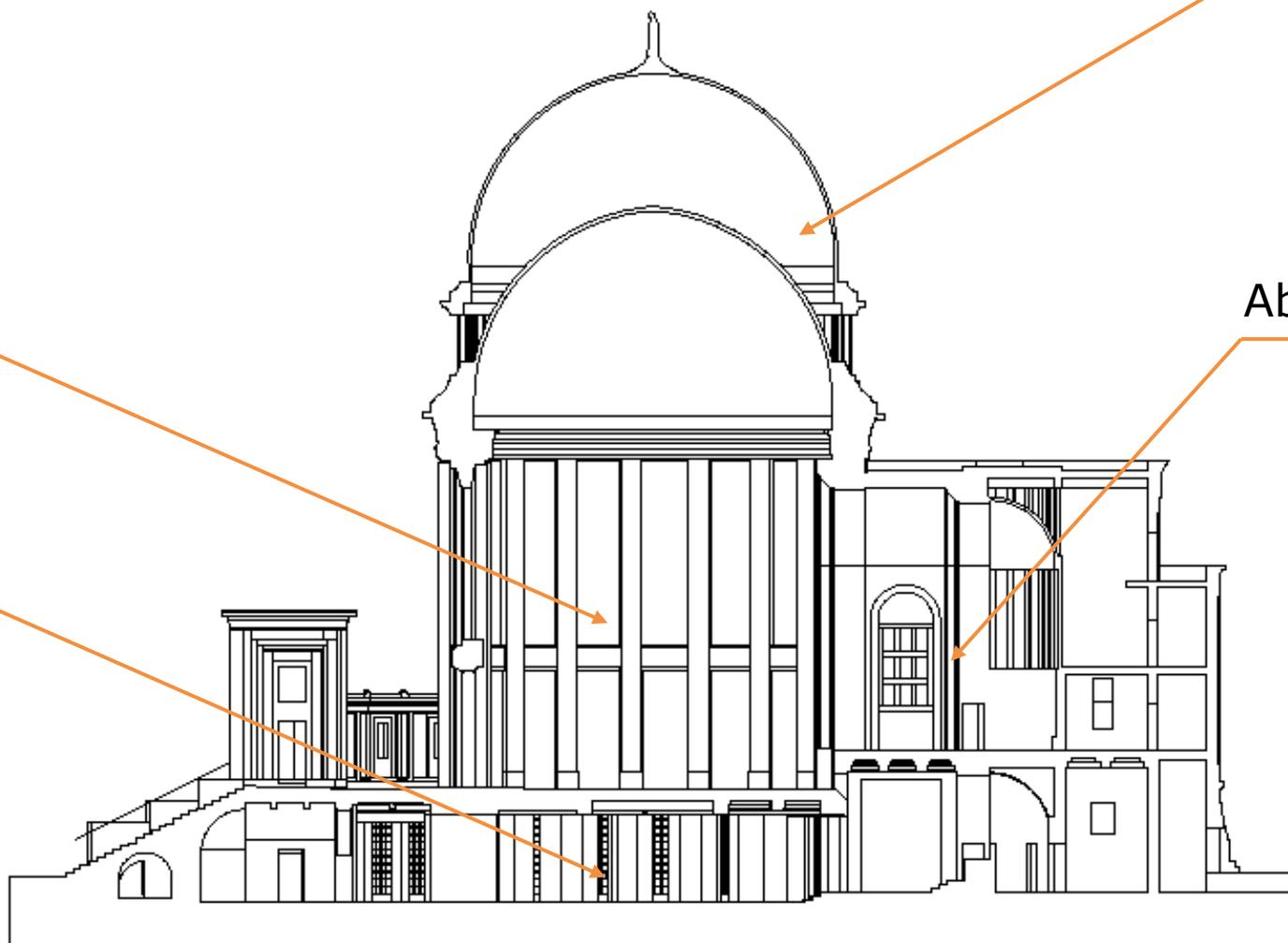


Centro documentale

Abside

Sala Grande

Cripta



SALA GRANDE



Considerazioni sulla geometria dell'ambiente e caratteristiche dei materiali

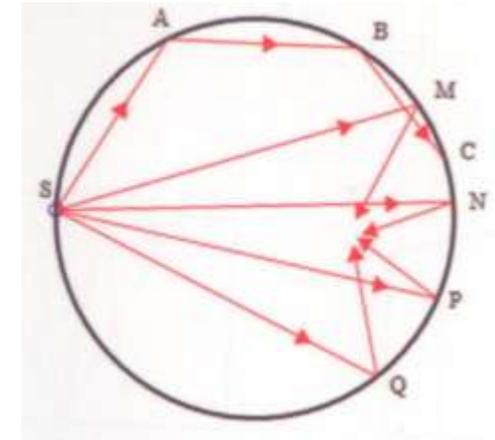
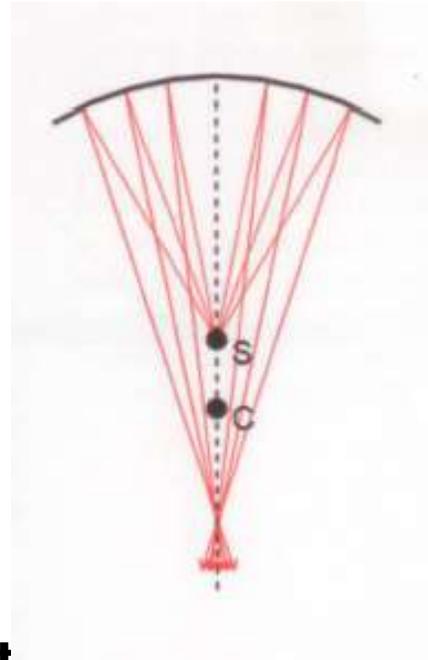
1) Condizione di **focalizzazione dovuta alla cupola**

$$r < 1/2 h$$

- Altezza cupola **$h=26,5\text{m}$**
- Raggio medio della cupola **$r=8,75\text{m}$**

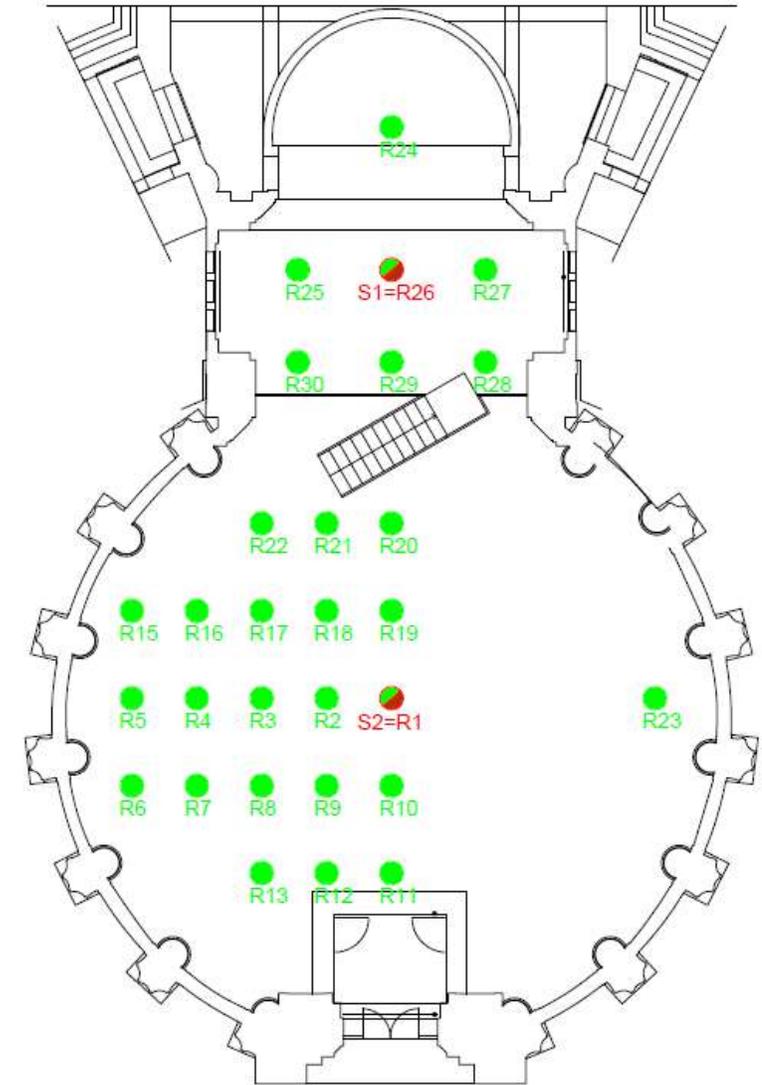
2) Fenomeni di focalizzazione dovuti alla **pianta circolare** ed effetto «galleria dei sussurri»

3) Tutte le superfici sono **altamente riflettent.** marmo, muratura intonacata e vetro strutturale

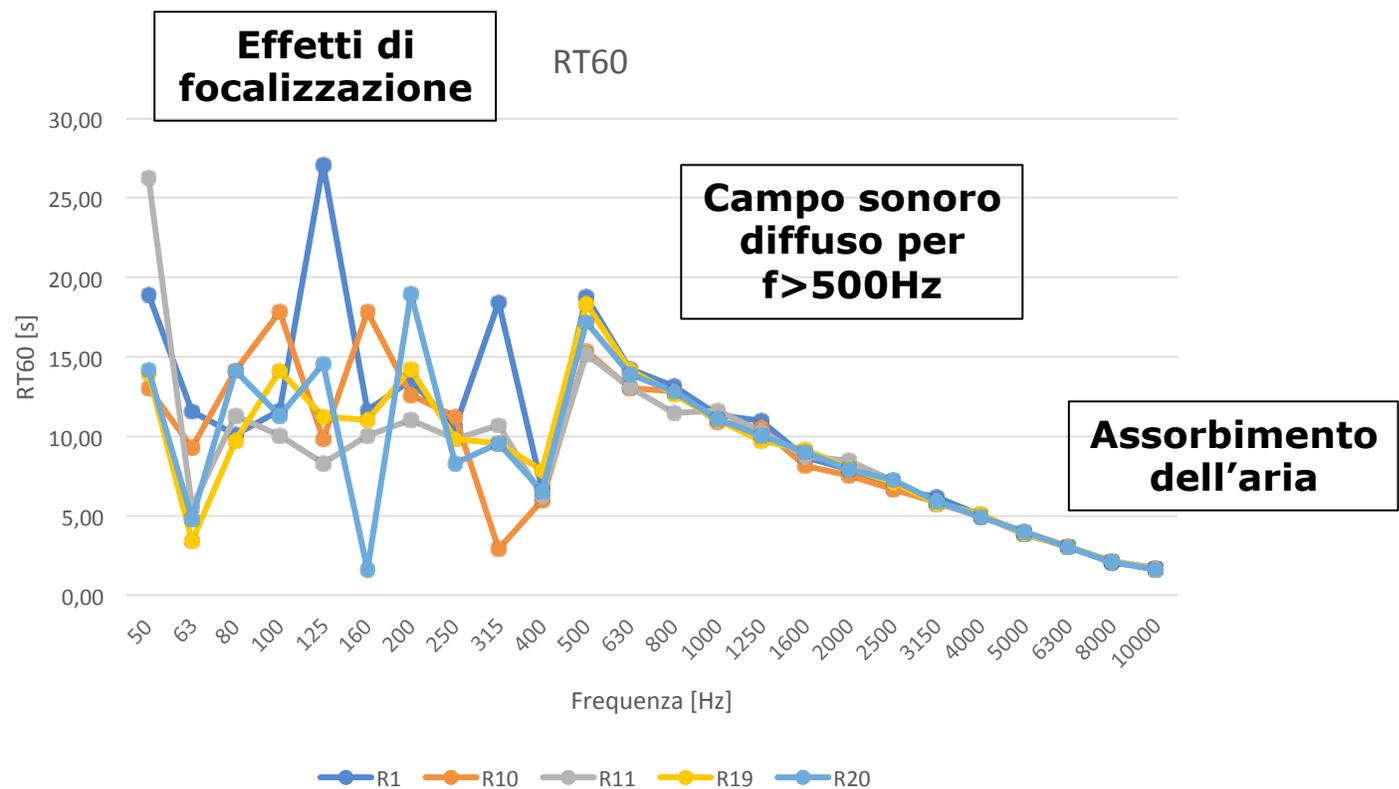


Caratterizzazione della sala grande

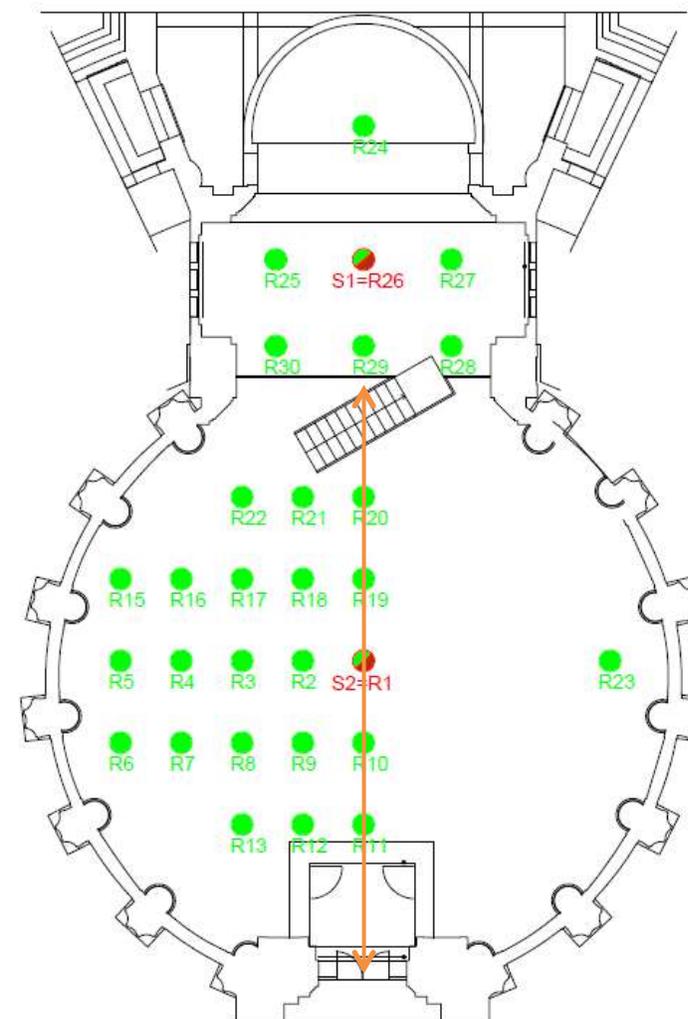
- Rilevazione metrica e fotografica dell'ambiente
- Misura del tempo di riverberazione RT60 con sorgente dodecaedrica



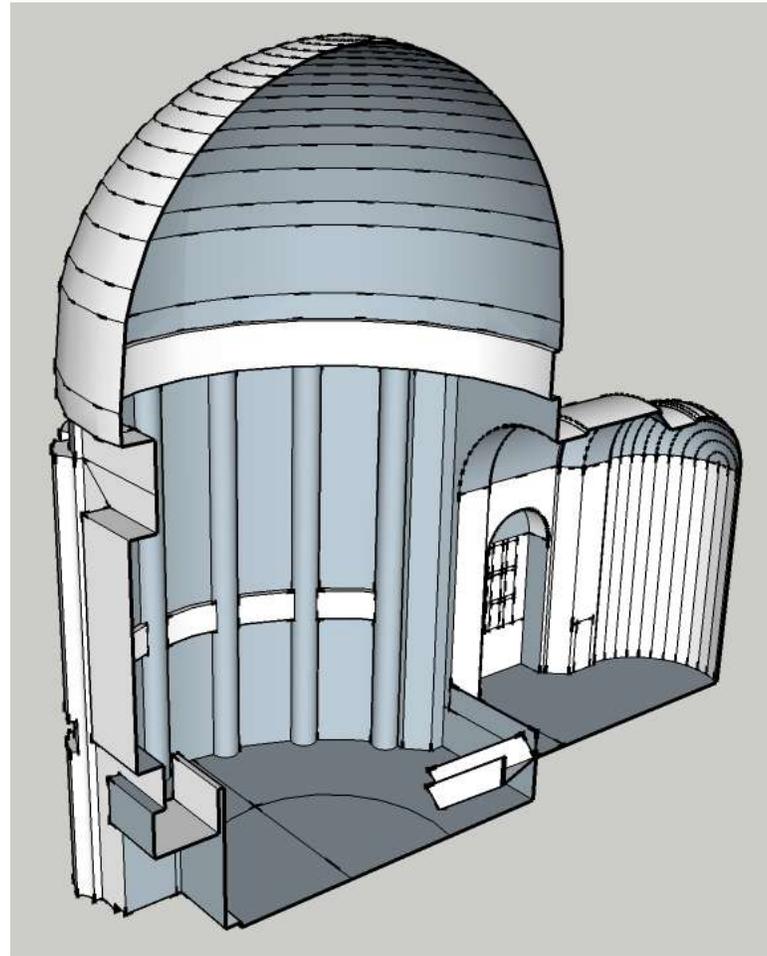
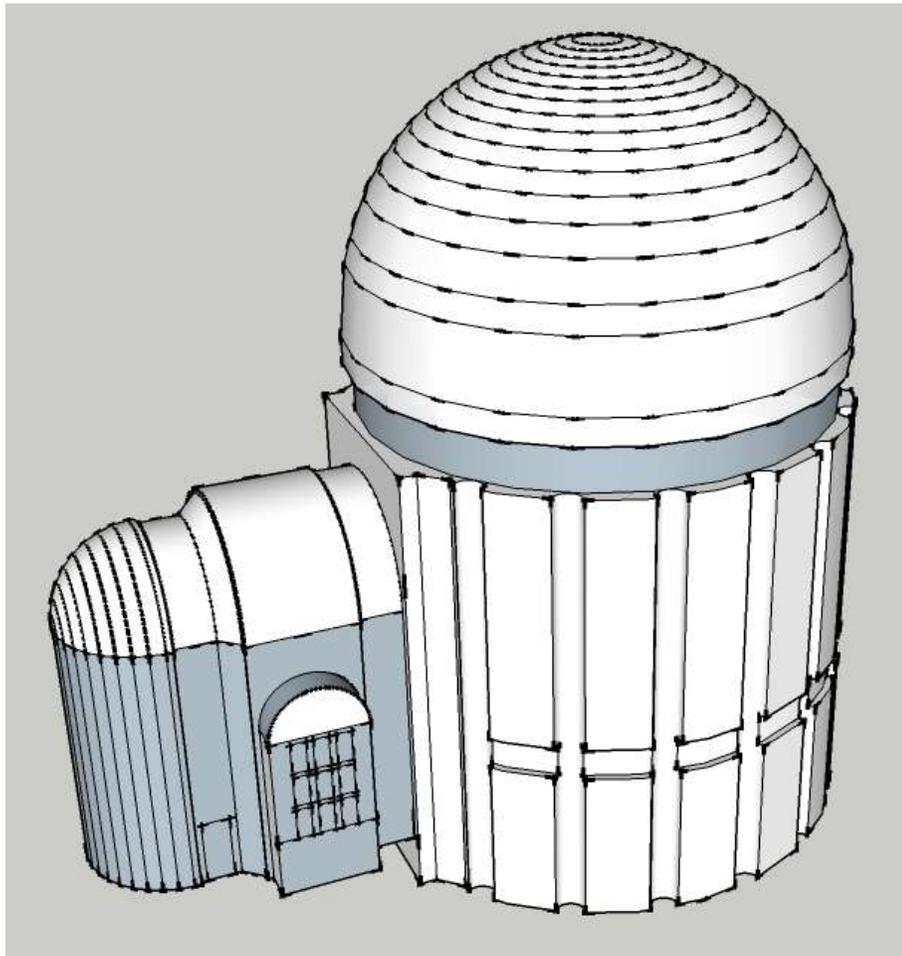
Caratterizzazione della sala grande



→ Massimo dell'energia sonora alle **frequenze medio-basse** [63-500]Hz che, a causa della loro lunghezza d'onda, sono quelle più enfatizzate dagli effetti di focalizzazione.

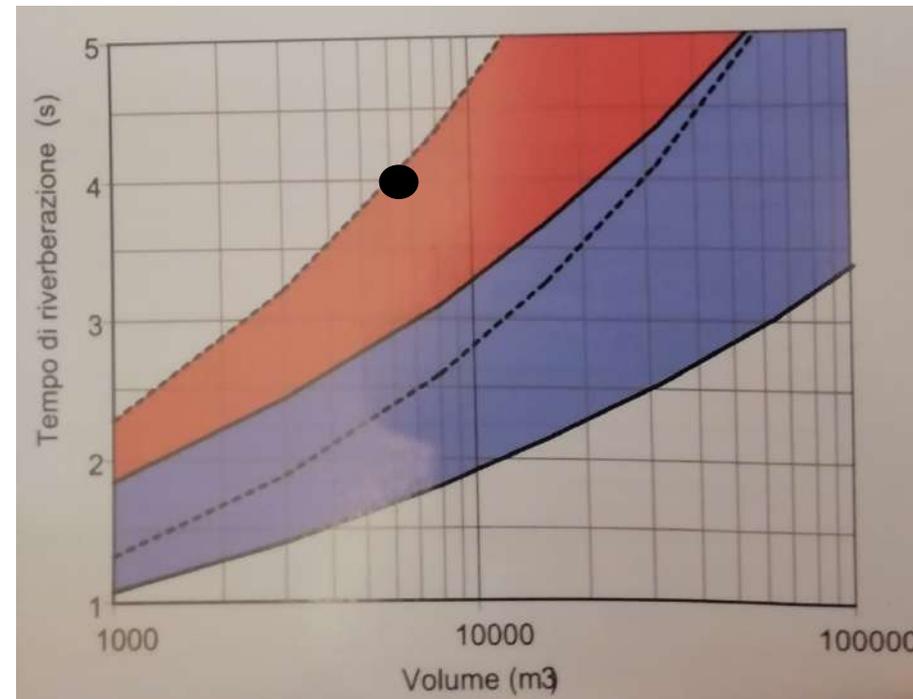
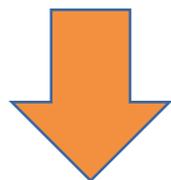


Creazione del modello acustico 3D e taratura



Specifiche di progetto

- **RT60= 4,0s** a chiesa vuota
- **STI>0,45** a chiesa vuota
- **BR= 1,20 difficilmente raggiungibile** a causa della grande quantità di energia sonora alle basse frequenze



si dovrebbe «rompere» la geometria regolare dell'ambiente inserendo una contro-cupola e delle superfici convesse ai lati della sala

Progetto di bonifica acustica

- In accordo con il progettista, inserimento di «**steli**» autoportanti h 5,20m l 2,00m composti da telaio metallico riempito con **materassino in poliester**e sp.150mm **densità 40kg/mc, incapsulato con tessuto ignifugo**
- **Moquette a pelo raso** sp.6mm a terra. Buon assorbimento per $f > 1\text{kHz}$. È utile per linearizzare la risposta alle alte frequenze in ambienti altamente riverberanti.
- **Tendaggi in velluto** drappeggiati per il 50% della superficie con funzione oscurante e fonoassorbente. Buon assorbimento a tutte le bande di frequenza



Media dei valori di RT60 tra 500Hz e 1kHz

RT60_pre=12,27s

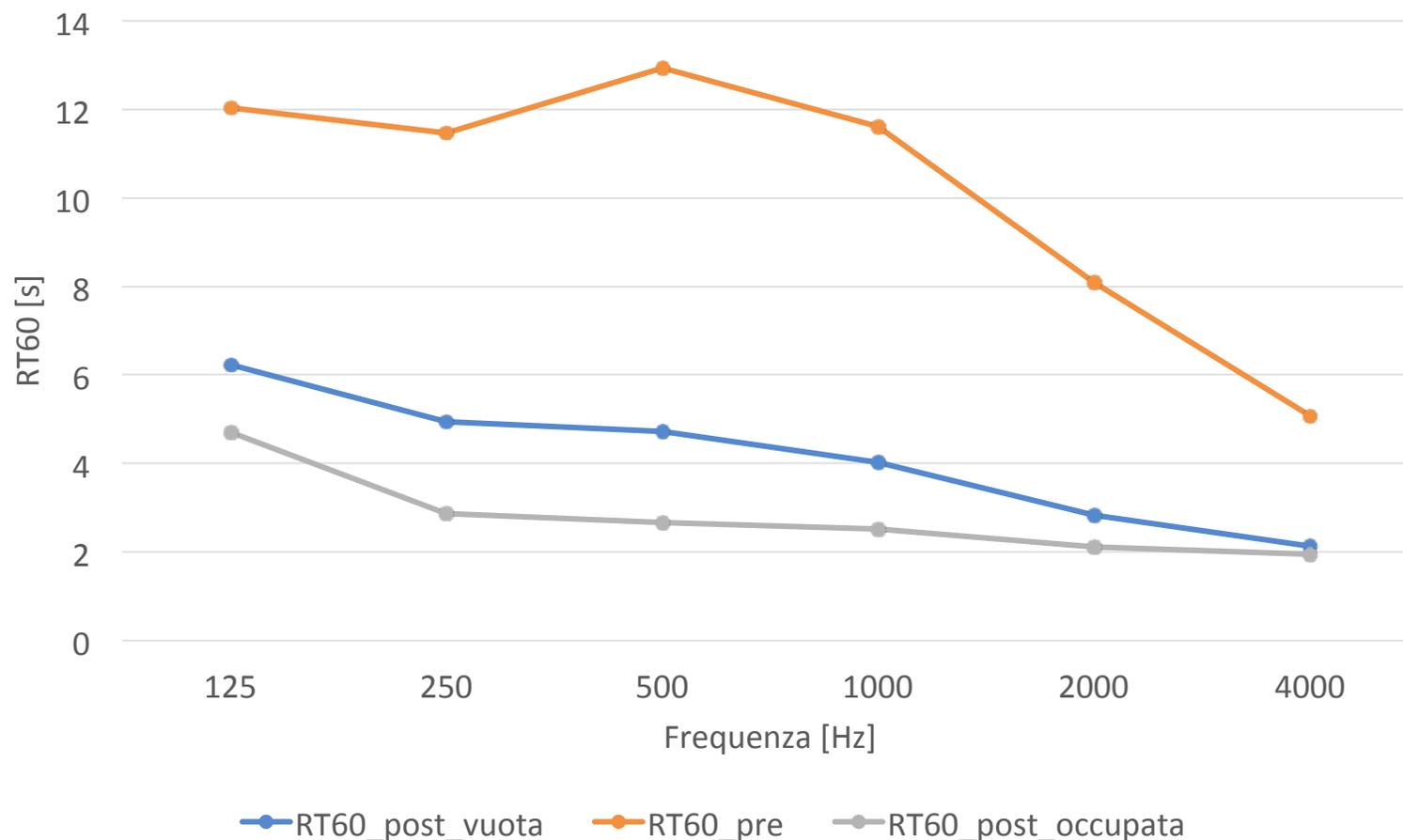
RT60_post_vuota=4,37s

RT60_post_occupata=2,59s

**340 persone
corrispondenti ad
un'occupazione di
1,7persona/mq**

BR = 1,46

Progetto di bonifica acustica



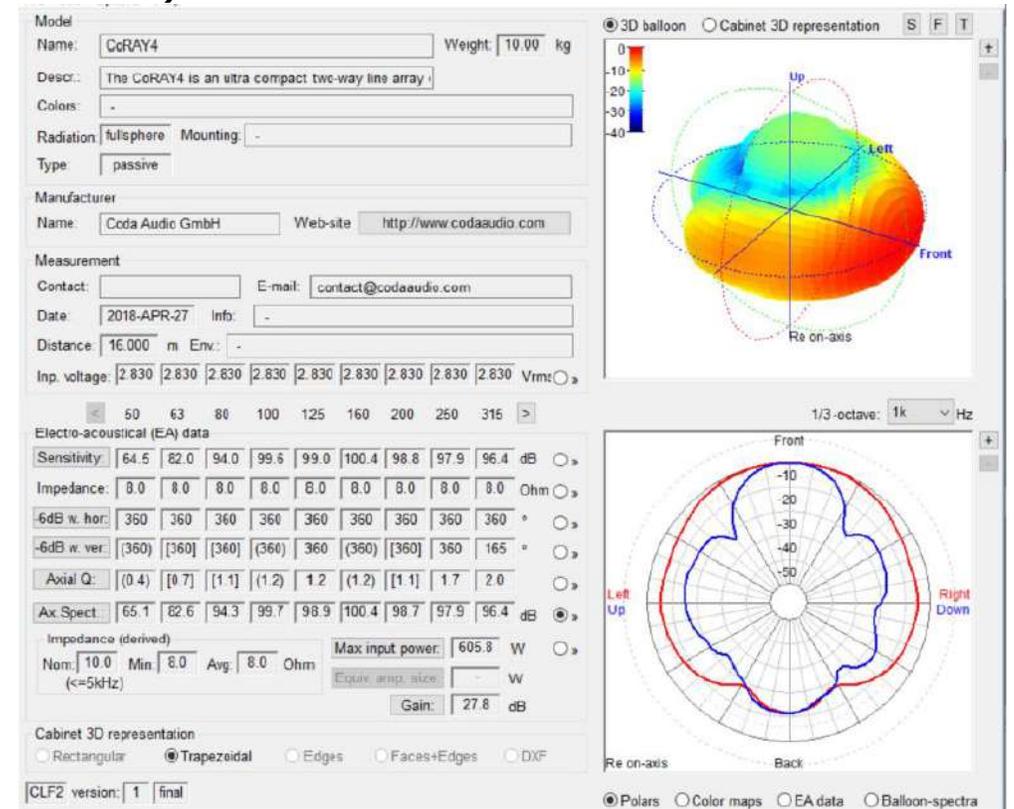
Progetto di bonifica acustica

CODA
C O D A A U D I O

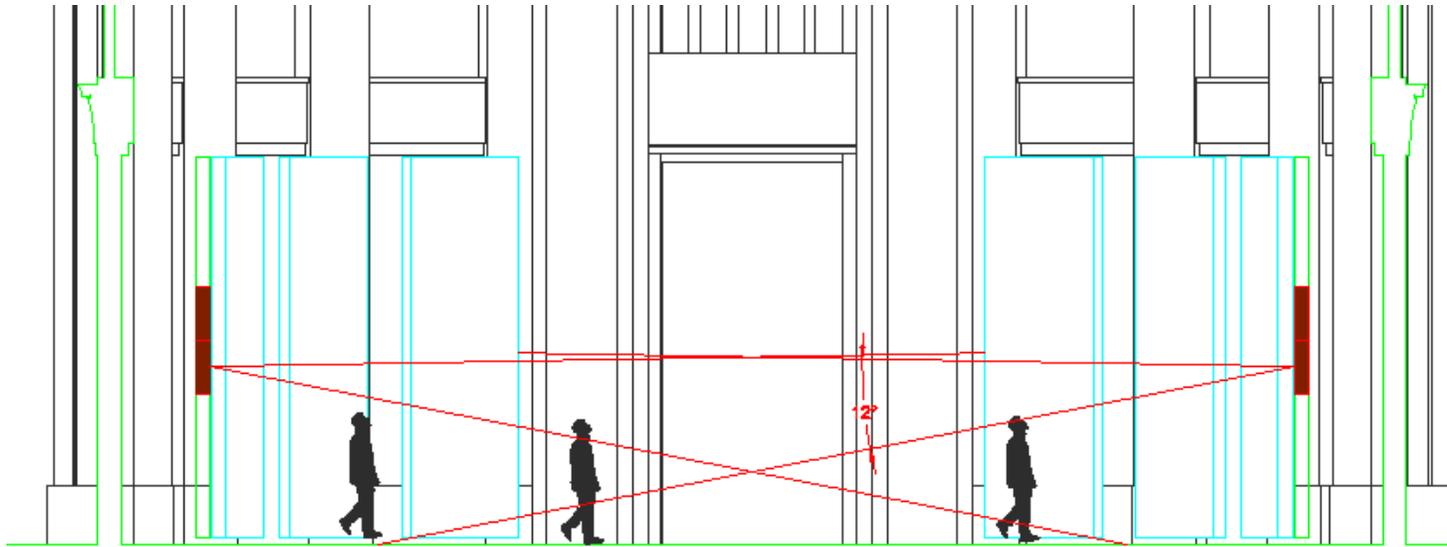


Caratteristiche dei diffusori sonori:

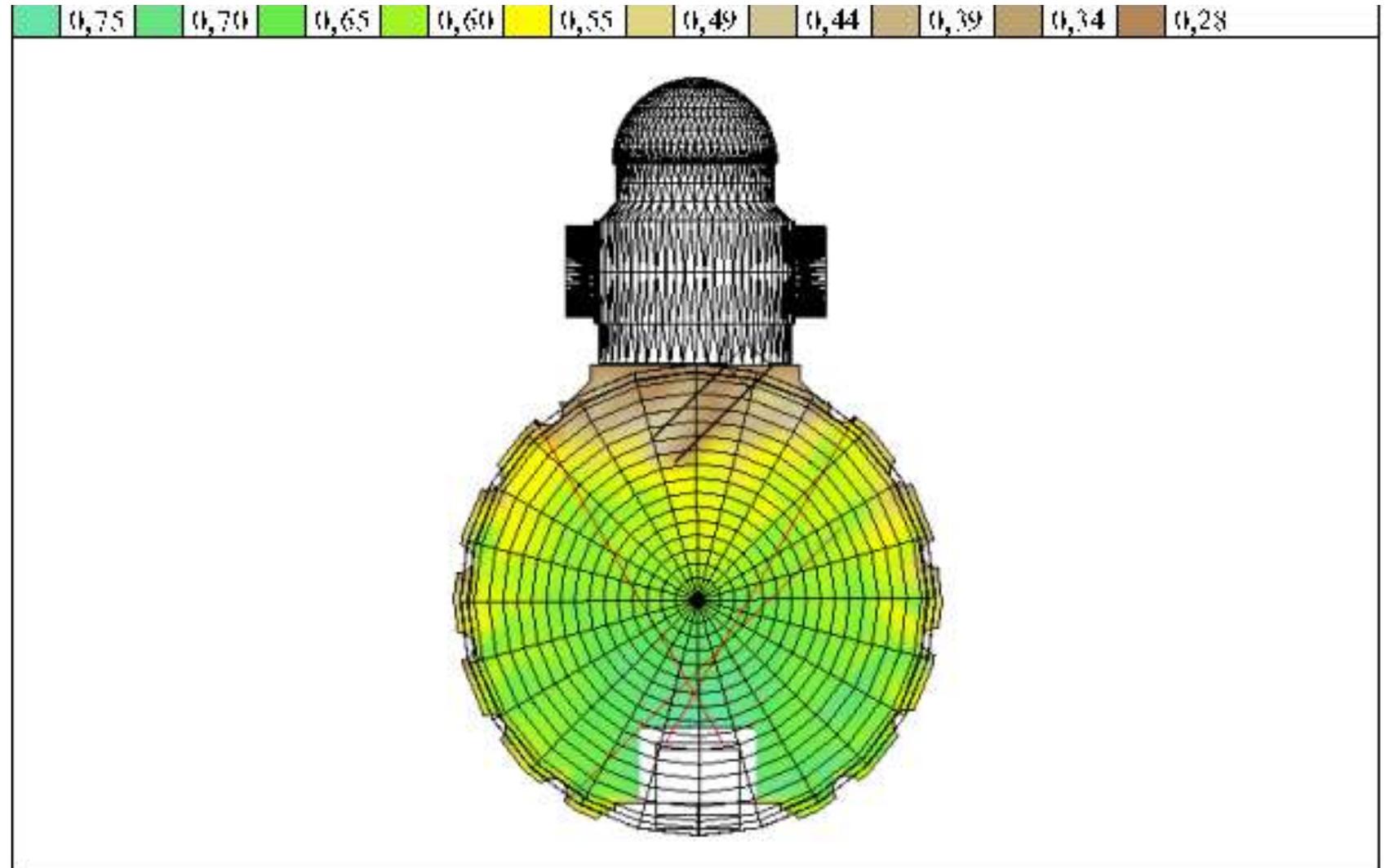
- **3** vertical line array **CODA CoRAY4i** + estensione per le basse frequenze **CoRAY4Li** (solo per effetti sonori museo)
- **Posizionamento asimmetrico** sulla pianta
- **Angolo di dispersione asimmetrico** sul piano verticale
- Trasduttori al neodimio a **onde planari**
- **Risposta in frequenza estesa**
- **Alta efficienza**



Progetto di bonifica acustica



Simulazione dello STI, configurazione funzione religiosa, chiesa vuota

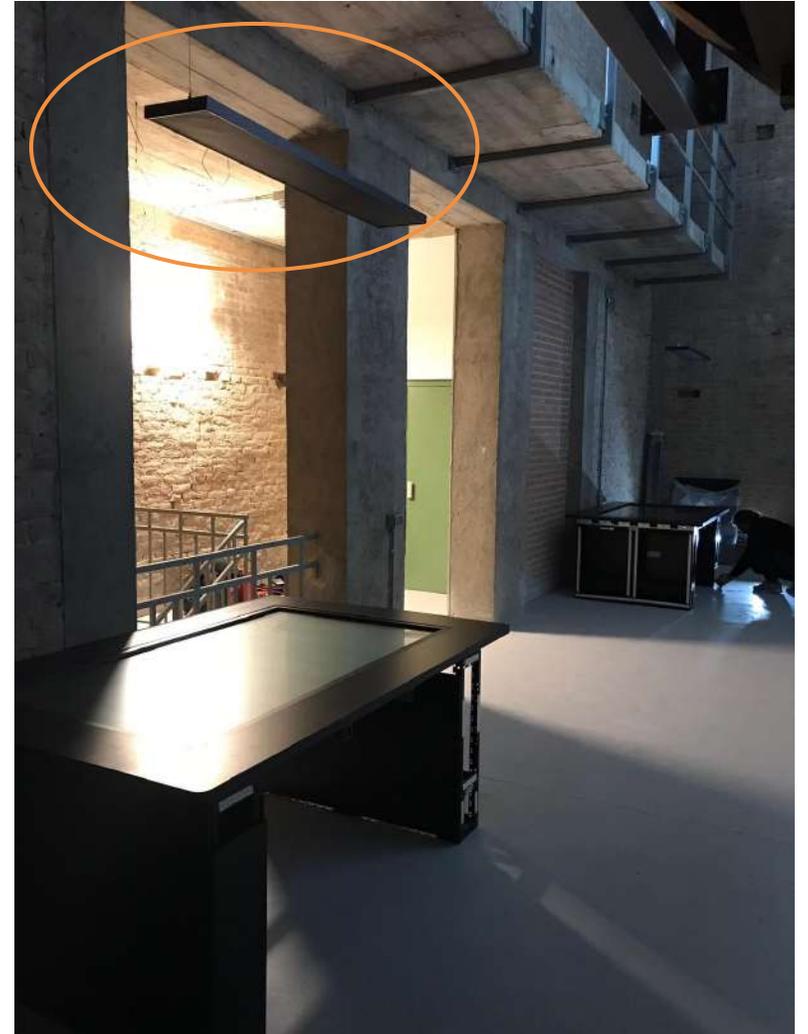


STI_medio=0,53

Dev.standard=0,12

Progetto di bonifica acustica

- Sistema multimediale nel centro documentale
- Diffusori sonori iper-direttivi **Panphonics Sound-shower** che sfruttano una **membrana elettrostatica** per la generazione di onde sonore planari
- Molto utili per la trasmissione del parlato in ambienti riverberanti oppure quando coesistono più sorgenti sonore



GRAZIE PER L'ATTENZIONE!

Mi trovate su 