

## LA NORMA ISO 3382 ED IL SUO IMPIEGO PER LA PROGETTAZIONE DEI TEATRI: I PARAMETRI DI SPAZIALITÀ

Raffaele Pisani (1), Paolo Onali (2), Chiara Devecchi (3)

- 1) Studio di Ingegneria Acustica Pisani, Rivoli (TO), [sia.pisani@tin.it](mailto:sia.pisani@tin.it)
- 2) Studio di Ingegneria Acustica Pisani, Rivoli (TO), [sia.pisani@tin.it](mailto:sia.pisani@tin.it)
- 3) Studio di Ingegneria Acustica Pisani, Rivoli (TO), [sia.pisani@tin.it](mailto:sia.pisani@tin.it)

### 1. Introduzione

Molto è stato scritto sul confronto tra i parametri misurati e quelli forniti dai modelli di simulazione. Poco è scritto come progettare i teatri con l'intento di ottenere i valori ritenuti ottimali dalla norma (ammesso che il pieno conseguimento dei valori ottimali sia garanzia di una buona acustica).

Le ricerche di acustica sono in continua evoluzione per individuare i parametri oggettivi misurabili che meglio descrivono le impressioni degli spettatori in una sala teatrale. La norma ISO 3382 riporta numerosi parametri atti a quantificare alcune delle impressioni soggettive universalmente riconosciute. Nel presente lavoro si vuole affrontare il problema pratico legato alla ottimizzazione, in sede progettuale, del valore del parametro  $J_{FL}$  (frazione energetica della prima energia laterale) che è legata alla percezione della spazialità. Le ampiezze delle prime riflessioni rapportate all'ampiezza del suono diretto producono numerosi effetti udibili alcuni dei quali possono essere spiacevoli come descritto dalla figura 1 [Barron Auditorium Acoustic and Architectural Design].

Il progettista di una nuova sala teatrale che si pone, tra gli altri, anche il problema di una soddisfacente impressione di spazialità, ricorre all'impiego di particolari forme da assegnare alle pareti laterali in modo da introdurre, per la maggior parte degli spettatori di una platea o balconata, quell'aliquota di energia diffusa proveniente lateralmente come necessaria al bilanciamento energetico ottimale descritto dall'area della figura 1 in cui è evidente l'impressione di spazialità della sorgente sonora.

Sono da evitare le superfici piane delle pareti laterali che possono produrre eccessive impressioni di spostamenti laterali della sorgente sonora sul palco. Nei posti più vicini alle pareti si può percepire, inoltre, una indesiderata colorazione timbrica del suono per effetto delle interferenze tra onda diretta e riflessa se il ritardo tra le due è minimo. Il progettista, è costretto a ricorrere ad elementi diffondenti che distribuiscano nello spazio l'energia sonora che incide sulle pareti laterali. L'impiego dei modelli in scala o geometrici consente di simulare il comportamento delle forme e dei materiali. Si assegnano agli elementi architettonici le proprietà fonoassorbenti e diffondenti ricavate mediante prove di laboratorio [ISO 354; ISO/FDIS 17497-1; ISO/CD 17497-2].

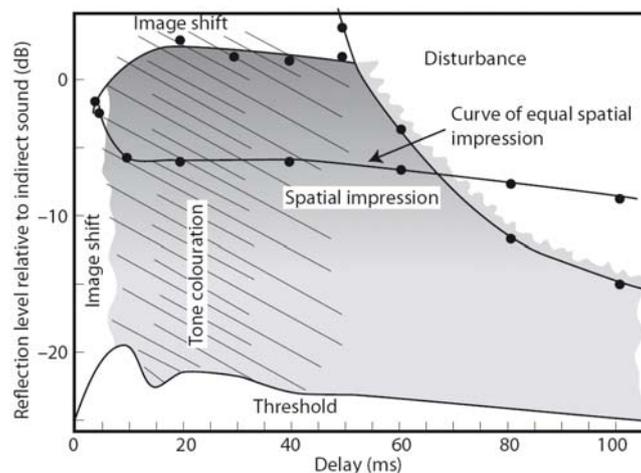


Figura 1 – Alcuni effetti udibili prodotti da una singola riflessione proveniente lateralmente in relazione al ritardo ed alla sua intensità

Il coefficiente di assorbimento del materiale ed il coefficiente di dispersione (scattering) devono essere utilizzati con cautela in quanto entrambi sono ricavati in campo riverberante ove l'incidenza del suono sul campione è casuale.

## 2. I parametri di spazialità e loro modellazione

Sono definiti analiticamente come frazioni energetiche della risposta all'impulso della sala. Per la stima della impressione soggettiva di spazialità occorre determinare l'energia che perviene all'ascoltatore lateralmente e prodotta principalmente dalle pareti. Definita una finestra temporale di 80 ms a partire dall'istante di arrivo del suono diretto, la frazione energetica laterale  $J_{LF}$  (chiamata anche LEF) contenuta nelle prime riflessioni è fornita dal rapporto della componente energetica proveniente lateralmente (escluso il suono diretto) e quella complessiva che comprende il suono diretto figura 2.

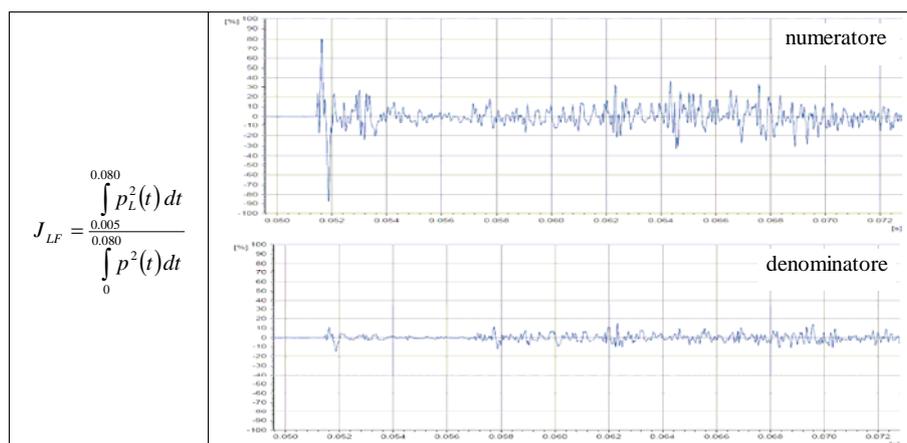


Figura 2 – Calcolo della frazione di energia laterale  $J_{LF}$  come rapporto tra energia rilevata da un microfono con risposta ad otto ed uno omnidirezionale

Il numeratore si calcola integrando il quadrato del segnale misurato con microfono la cui risposta polare è a figura di otto con asse di minima sensibilità rivolto verso la

sorgente. Si esclude la poca energia ancora appartenente al suono diretto mediante la integrazione del segnale rilevato dopo 5 ms dall'arrivo del suono diretto.

Il progettista deve poter dimensionare le forme in relazione alla distribuzione polare dell'energia diffusa dalle pareti laterali che intende conseguire. Occorre tener conto che l'angolo di incidenza sulle pareti non è casuale bensì è compreso in uno dei possibili angoli in relazione alla posizione della sorgente sul palco. La risposta polare della diffusione deve essere orientata in modo da coinvolgere la maggiore area occupata dagli spettatori e fornire i tempi di arrivo compatibili con le indicazioni desunte dalla figura 1. Per questo motivo il valore del coefficiente di diffusione ricavato mediante prove di laboratorio [ISO/FDIS 17497-1] è limitativo per la progettazione.

### 3. La riflessione speculare

Per riflessione speculare di una parete piana è da intendersi l'energia riflessa in sala dalla sorgente immagine costruita geometricamente sulla parete. Il modello geometrico consente un calcolo più realistico dell'indice di spazialità  $J_{LF}$  in quanto non vi sono elementi diffondenti sulle pareti figura 3. L'esempio è tratto dalle misurazioni effettuate nel salone d'onore del palazzo Taffini in Savigliano (CN) con pianta rettangolare.

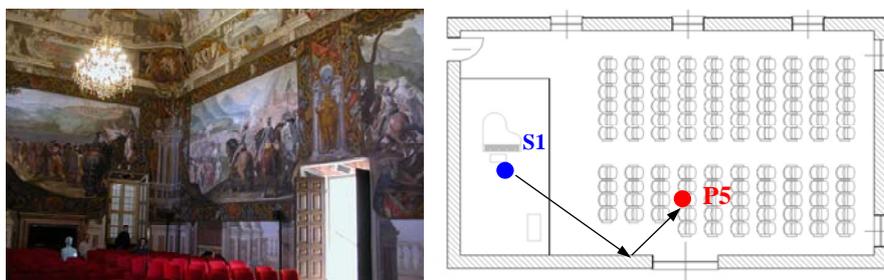


Figura 3 - Pianta e disposizione del punto sorgente e ricevitore in un salone a pianta rettangolare per la determinazione di  $J_{LF}$

Il programma di simulazione consente di desumere la risposta all'impulso ed il parametro  $J_{LF}$ . Nella figura 4 si confronta la risposta all'impulso desunta con il modello e quella realmente misurata in sala.

La presenza degli unici elementi diffondenti (finestre e poltrone) e la forma a botte della volta si traducono, nel modello, in coefficienti di scattering non noti a priori. Nella tabella 1 che segue si confrontano i valori calcolati con quelli realmente misurati in sala nel punto P5 di figura 3. Si simulano due scenari ove i valori del coefficiente di scattering sono minimi e sono massimi a simulare la presenza di elementi diffondenti.

Tabella 1 – Risultati di misurazioni di  $T_{30}$  e  $J_{LF}$  in una sala a pareti parallele e lisce; confronto con i valori ottenuti dalla simulazione con modello geometrico.

	$T_{30}$ [s]	Frazione $J_{LF}$ [-]
Valori misurati in sala	2,98	0,24
Valori desunti con scattering ridotto	2,95	0,28
Valori desunti con scattering elevato	2,95	0,25

Si rileva una buona corrispondenza dei valori del tempo di riverberazione sia misurati, sia stimati dal modello attribuendo un minimo (10%) ed un massimo (90%) del co-

efficiente di scattering. Si rileva, al contrario, una riduzione della frazione energetica  $J_{LF}$  se si aumenta il coefficiente di scattering delle pareti laterali. Se si tiene conto che la soglia di percezione di una differenza dei valori di  $J_{LF}$  è pari a 0.05, si può dedurre che l'effetto di un elemento estremamente diffondente posto sulle pareti laterali piane non verrebbe percepito da un ascoltatore posto in prossimità della parete.

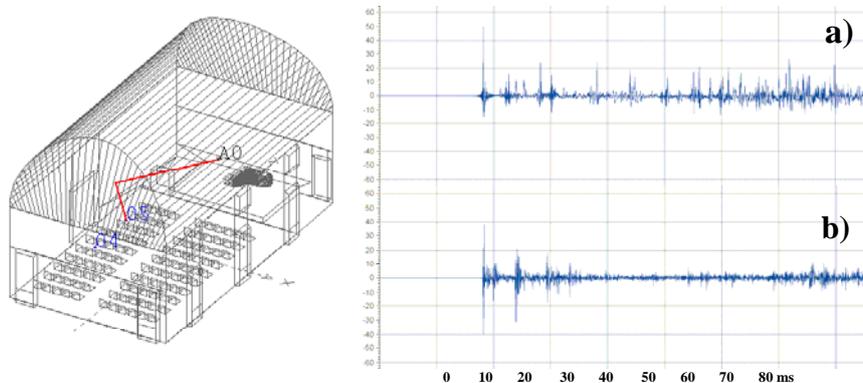


Figura 4 – Modello di simulazione ed indicazione della prima riflessione sulla parete piana. Risposta all'impulso calcolata (a) e misurata in sala (b).

#### 4. La progettazione volta al controllo dell'ampiezza apparente della sorgente

La forma in pianta di una sala (rettangolare, a ventaglio etc.) influenza i valori di  $J_{LF}$  nel senso che le pareti laterali e parallele determinano un incremento dell'energia riflessa lateralmente con valori più elevati. Si percepiscono, però, fenomeni collaterali indesiderati quali un effetto di eccessivo spostamento laterale di sorgenti direttive (trombe etc.) colorazioni timbriche etc. Si analizza il caso relativo alla progettazione e successiva verifica sperimentale del teatro Carbonetti, a pianta rettangolare, recuperato nel comune di Broni (Pavia). Per evitare i problemi legati ad eccessive e concentrate riflessioni sulle pareti laterali piane si disegnano due pareti sagomate per aumentare la diffusività nell'area occupata dal pubblico in platea ed in galleria con l'accortezza che nei punti più distanti dal palco le riflessioni laterali provengano, in maggior numero, dalle pareti laterali più vicine alla scena figura 5.

Le onde presentano una profondità media variabile di 0.46 m paragonabile a  $\frac{1}{4}$  di lunghezza d'onda di un suono di frequenza pari a  $f = 190$  Hz. La lunghezza dell'onda, che si ripete con periodicità pari a 1.45 m, ed è compatibile con la frequenza di  $f = 290$  Hz (il limite inferiore al disotto del quale prevale la riflessione speculare).

Il modello geometrico in 3D realizzato per la progettazione, non è in grado di descrivere il comportamento del campo sonoro prodotto per diffusione delle pareti laterali: il modello richiede un valore di scattering che non è noto a priori se non mediante analisi di dettaglio con la tecnica degli elementi finiti FEM. Se pur noto con precisione il coefficiente di scattering, in quanto misurato in camera riverberante, esso non risulta adatto a concretizzare l'idea del progettista acustico che desidera conseguire una risposta polare della diffusione non uniforme ma con lobi rivolti verso i punti più distanti dalla scena. Si scelgono tre punti in pianta a diversa distanza dalla parete laterale per i quali si calcola con il modello il tempo di riverberazione e la frazione energetica della prima riflessione laterale figura 6. Nella tabella 2 si confrontano i valori misurati e quelli stimati con il modello con la sorgente posta in S1 ipotizzando pareti laterali piane ed ondulate.

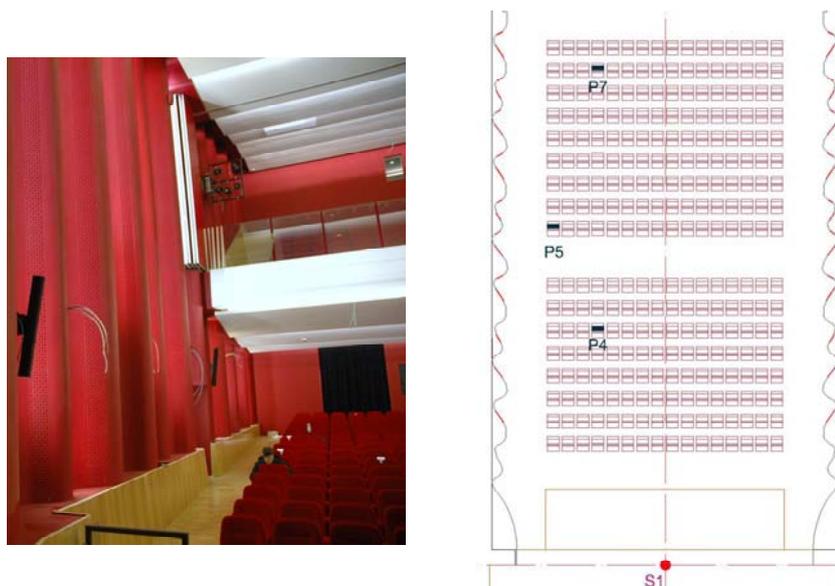


Figura 5 – Vista degli elementi diffondenti e assorbenti, collocati a parete nel teatro di Broni: foto e pianta della platea.

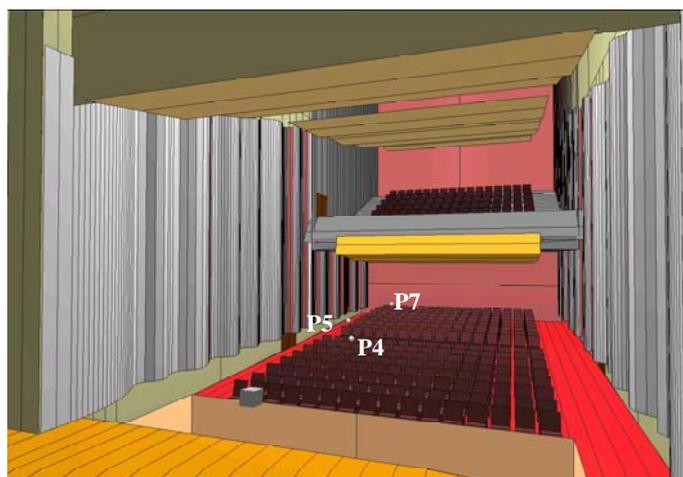


Figura 6 – Modello in 3D con indicati i punti di misura P4;P5;P7 utilizzati per le simulazioni.

Come si evince, la formazione di un campo sonoro più diffuso porta ad una riduzione del tempo di riverberazione. La maggiore energia sonora diffusa dalle pareti laterali riduce le differenze del parametro di spazialità  $J_{LF}$  nei punti P4 (più vicino alla scena), P5 (al centro della sala e più vicino alla parete) e P7 (più lontano e sotto la balconata).

Tabella 2 – Risultati di misurazioni di  $T30$  e  $J_{LF}$  e valori stimati dal modello

	$T30$ [s]			$J_{LF}$ [-]		
	P4	P5	P7	P4	P5	P7
Valori misurati in sala	1,0	0,9	1,0	0,19	0,12	0,16
Valori stimati con pareti piane	1,8	1,7	1,7	0,33	0,34	0,26
Valori stimati pareti ondulate	1,3	1,2	1,2	0,21	0,22	0,18

## 5. Misura in opera della risposta polare di diffusività

La norma ISO/CD 17497-2 si riferisce a misure di laboratorio e non può essere utilizzata in opera ove non si verificano le condizioni di campo libero e, soprattutto, non può essere rilevata la risposta all'impulso rimuovendo la parete per mantenere l'effetto diffondente di altri elementi quali le poltrone, le vele a soffitto etc. Si procede:

- ad individuare i punti ricettore disposti ad arco e distanti 5 m dal punto ideale O.
- a posizionare gli altoparlanti su un arco di raggio pari a 10 m
- a rilevare con un microfono omnidirezionale la risposta all'impulso  $h_1(t)$  e con microfono a cardioide l'energia proveniente dalla parete.
- Si determina la risposta all'impulso tra altoparlante e punto di ricezione inserendo tra microfono e parete un pannello fonoisolante e fonoassorbente per ridurre (idealmente eliminare) le riflessioni sulla parete ondulata  $h_2(t)$
- Si esegue la differenza  $h_3 = h_1 - h_2$  eliminando in  $h_1$  le riflessioni spurie
- Si individua, la finestra  $T = t_2 - t_1$  che contiene l'energia diffusa dalla parete.
- Si calcola l'energia contenuta nella finestra  $T$  della risposta all'impulso  $h_3$  e si rapporta tale energia a quella diretta che perviene al microfono
- Si deducono i diagrammi polari dai risultati ottenuti nel punto g).

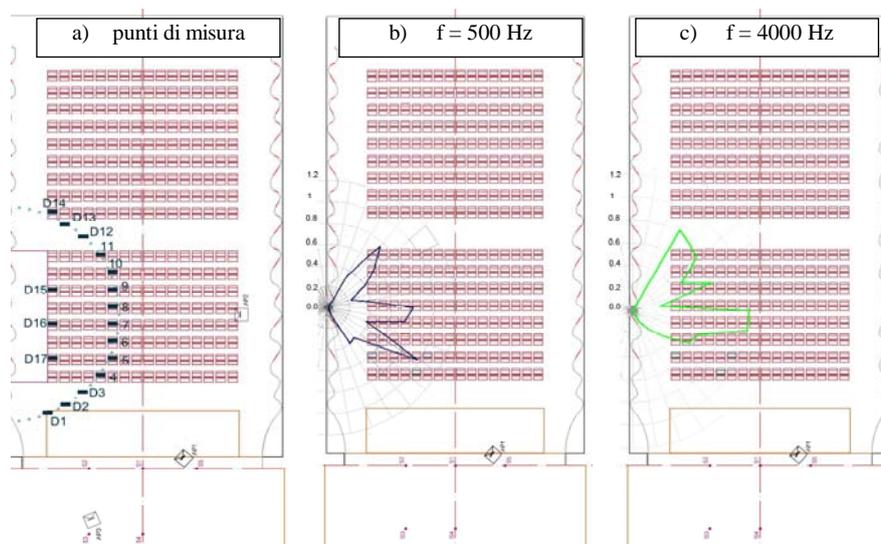


Figura 7 – Posizione degli altoparlanti e dei punti di misura. Risposta polare alle frequenze di 500 Hz e di 4.000 Hz.

L'energia sparpagliata sulla platea non è disposta secondo una riflessione speculare bensì presenta dei lobi di diversa ampiezza e direzione.

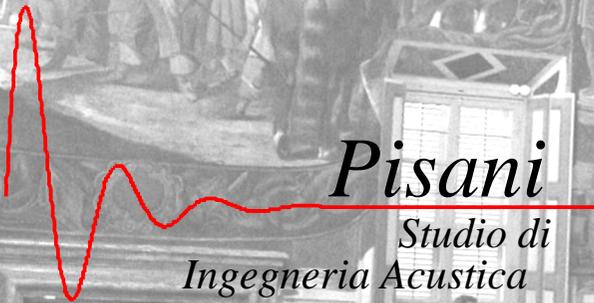
## 6. Conclusioni

Il controllo dei valori del parametro  $J_{LF}$  in sede di progettazione non è possibile utilizzando i valori dei coefficienti di scattering sulle pareti laterali. Occorre poter inserire, nel modello, il diagramma di diffusione polare di strutture aggiunte sulle pareti laterali se si ritiene utile mantenere un valore appropriato del parametro sia in prossimità delle pareti sia nei punti più lontani dalla scena.

# **PRESENTAZIONE**

# La norma ISO 3382 ed il suo impiego per la progettazione dei teatri: i parametri di spazialità

Raffaele PISANI - Paolo ONALI - Chiara DEVECCHI

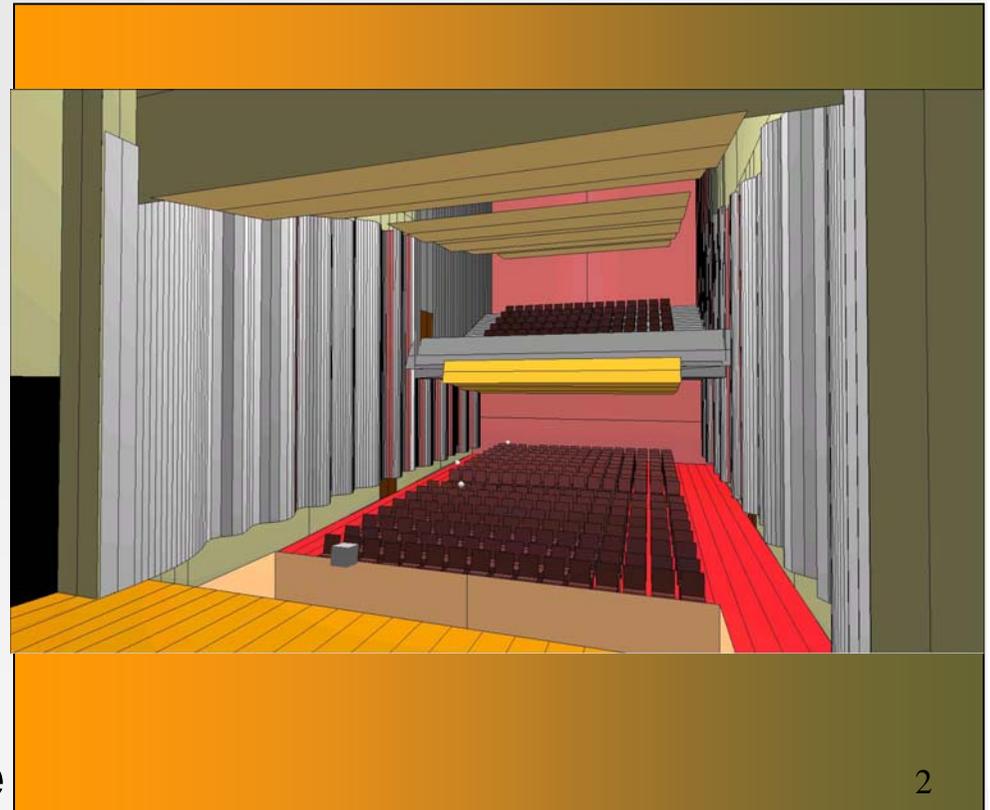


*Pisani*  
Studio di  
Ingegneria Acustica

Studio di ingegneria acustica PISANI  
via cavalieri di Vittorio Veneto, 8  
10098 Rivoli (TO)  
e-mail: [sia.pisani@tin.it](mailto:sia.pisani@tin.it)

**La qualità acustica di una sala viene descritta dai valori che sono definiti dalla norma ISO 3382-1.**

- **Il progetto acustico di una nuova sala teatrale dovrebbe iniziare da una idea dell'architetto in collaborazione con l'acustico il quale definisce i valori dei parametri da conseguire**
- **Il problema è quello di saper individuare a priori le forme ed i materiali che consentono di raggiungere gli obiettivi.**
- **Normalmente si esegue solo una verifica con i modelli di simulazione.**
- **La risposta all'impulso contiene la maggior parte delle informazioni necessarie per una corretta progettazione**



**Prima di impostare un progetto è importante saper prevedere le risposte acustiche delle possibili strutture fonoassorbenti e diffondenti il suono che si intende utilizzare.**



**Le schede tecniche dei materiali forniscono il coefficiente di assorbimento ed il coefficiente di dispersione (*scattering*).**

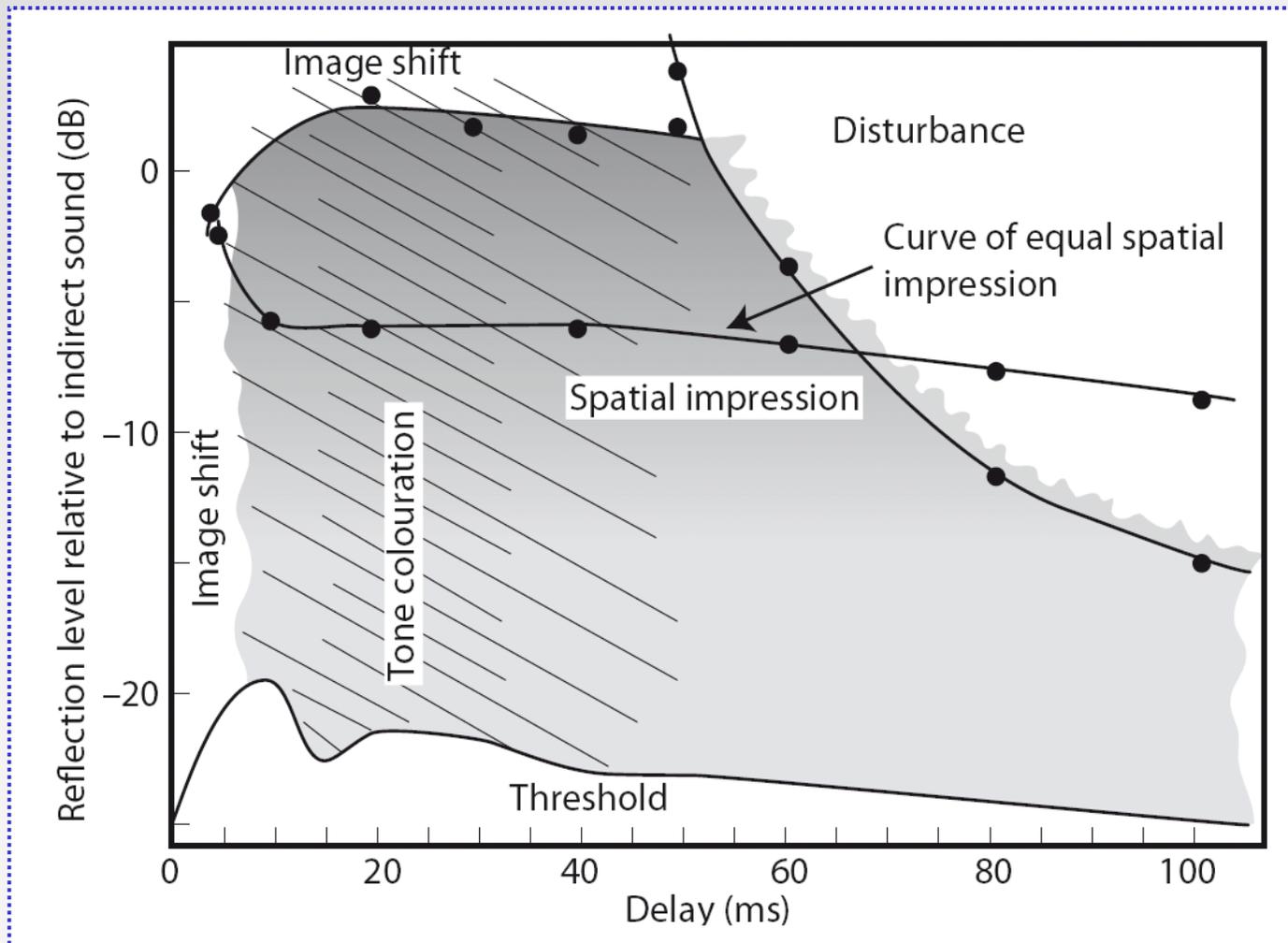
**Questi unici dati devono essere utilizzati con cautela in quanto entrambi sono ricavati in campo riverberante ove l'incidenza del suono sul campione è casuale.**



**Le caratteristiche dell'assorbimento acustico si ricavano in camera riverberante con i criteri della ISO 354**

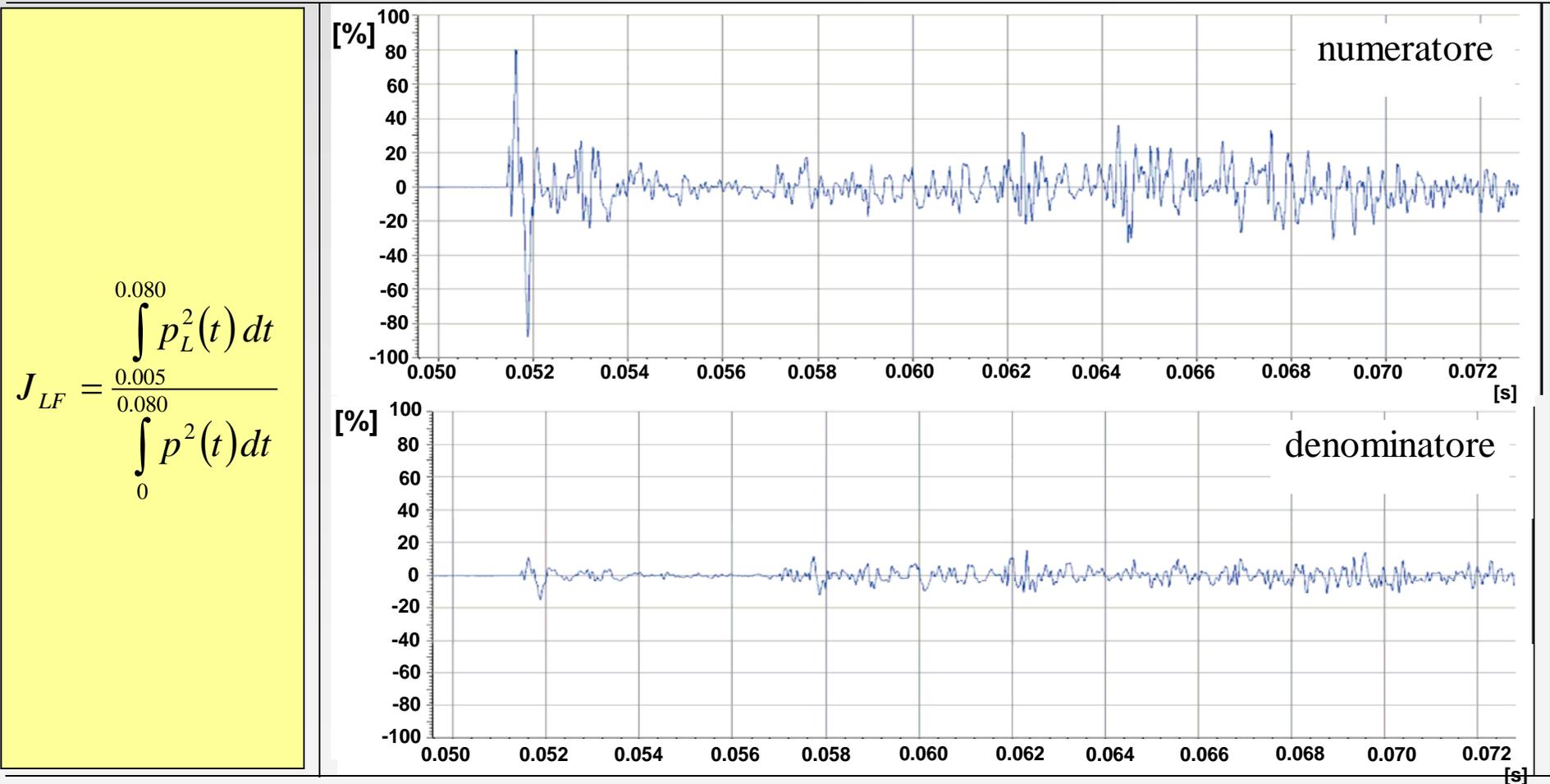
**Le proprietà diffondenti si ricavano con prove di laboratorio in camera semi-anecoica (ISO 17497/1) ed in camera riverberante (ISO 17497/2)**

Si vuole affrontare il problema pratico legato alla progettazione di elementi architettonici in grado di migliorare la **percezione della spazialità**.



La **sensazione di spazialità** viene quantificata dal valore del parametro  **$J_{LF}$**  (*frazione energetica della prima energia laterale*)

La frazione energetica laterale  $J_{LF}$  (chiamata anche LEF) si deduce dalla risposta all'impulso ottenuta, ad esempio, con un microfono con risposta polare omnidirezionale ed un microfono con risposta polare a forma di 8



*Si considera una finestra temporale di 80 ms*

## *La riflessione speculare*

**Per aumentare la sensazione di spazialità dalla sorgente sonora, il progettista deve poter dimensionare le forme in relazione alla distribuzione polare dell'energia diffusa dalle pareti laterali.**



**Si porta ad esempio il risultato di una modellazione e sperimentazione su una sala a pianta rettangolare con pareti lisce ed affrescate e quelle di un teatro progettato per controllare le riflessioni delle pareti laterali.**

## *La riflessione speculare*



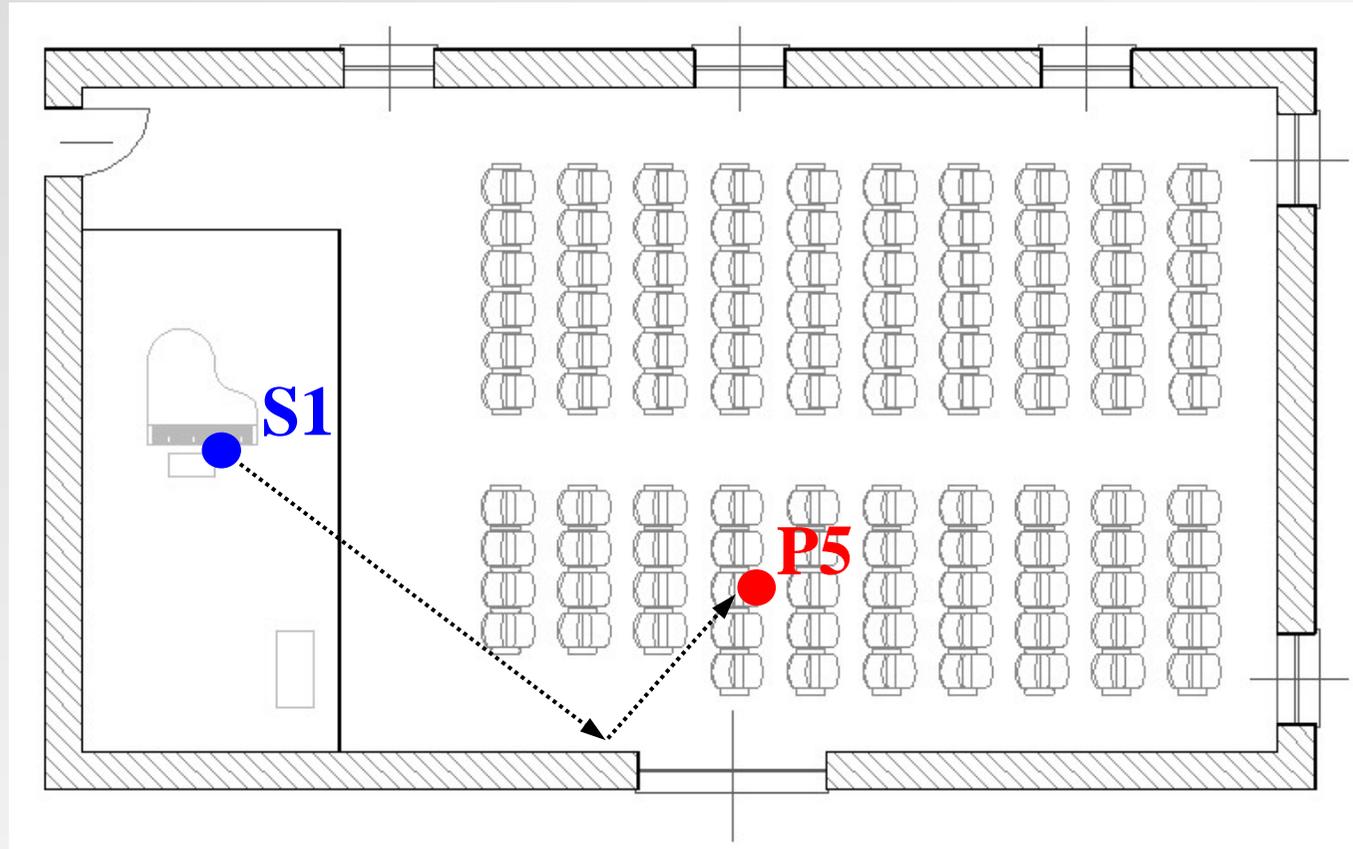
**Salone d'onore del palazzo Taffini di Savigliano (CN)**

## *La riflessione speculare*

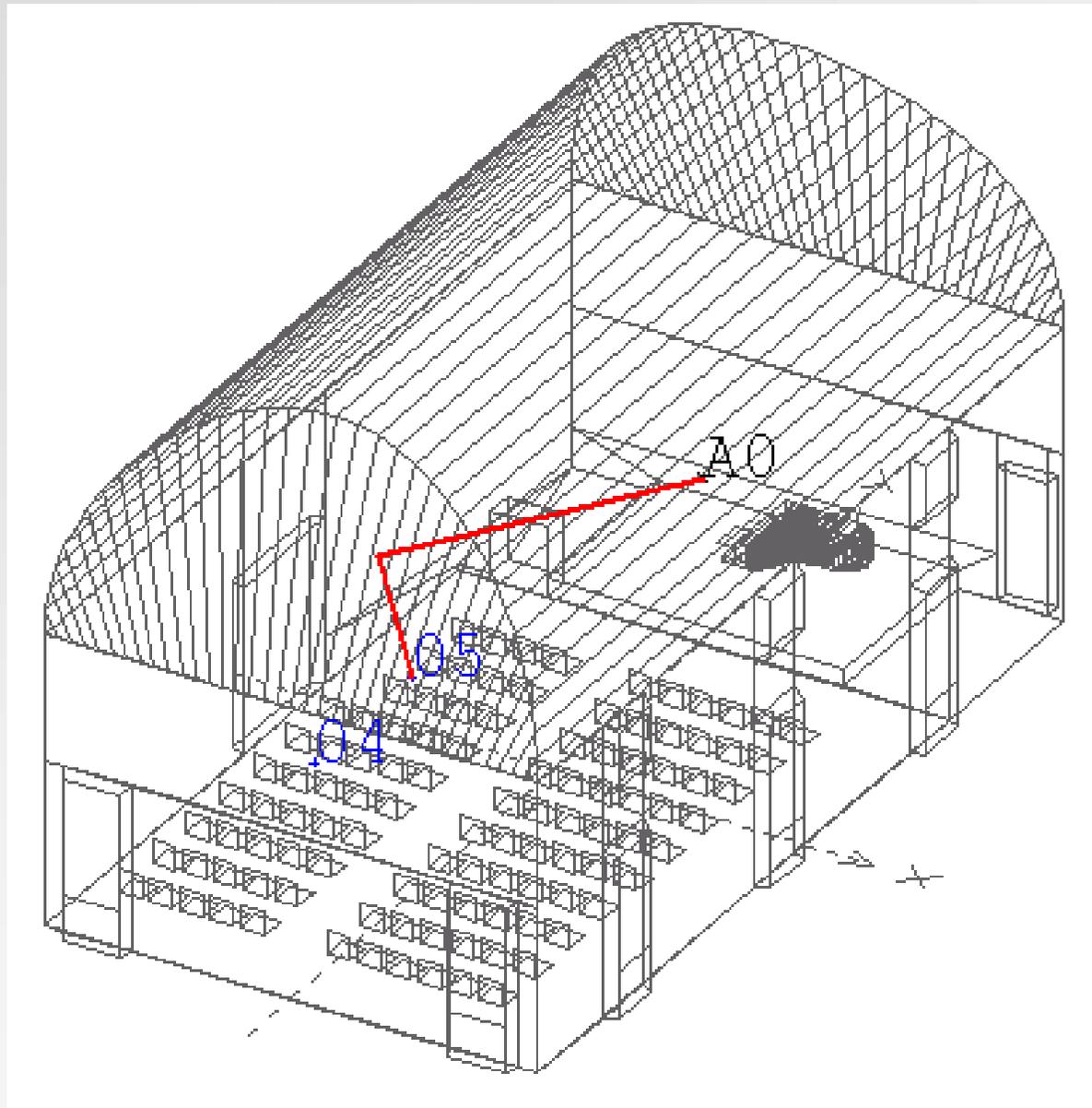


**Palco utilizzato per conferenze e concerti musicali**

## *La riflessione speculare*

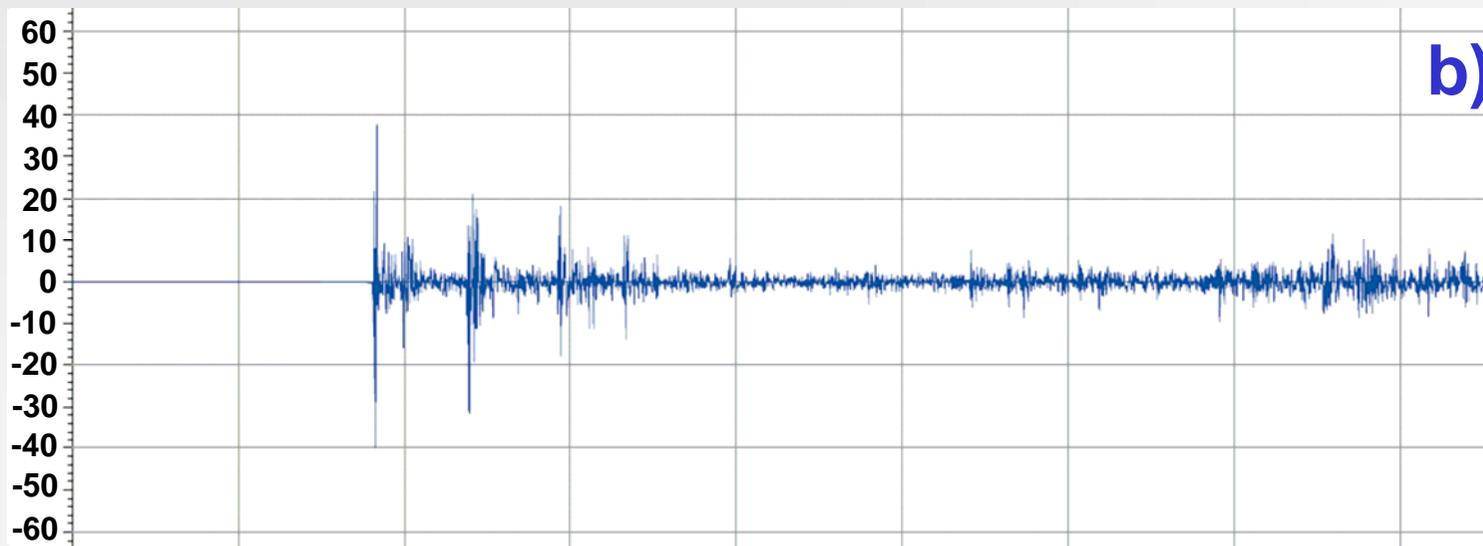
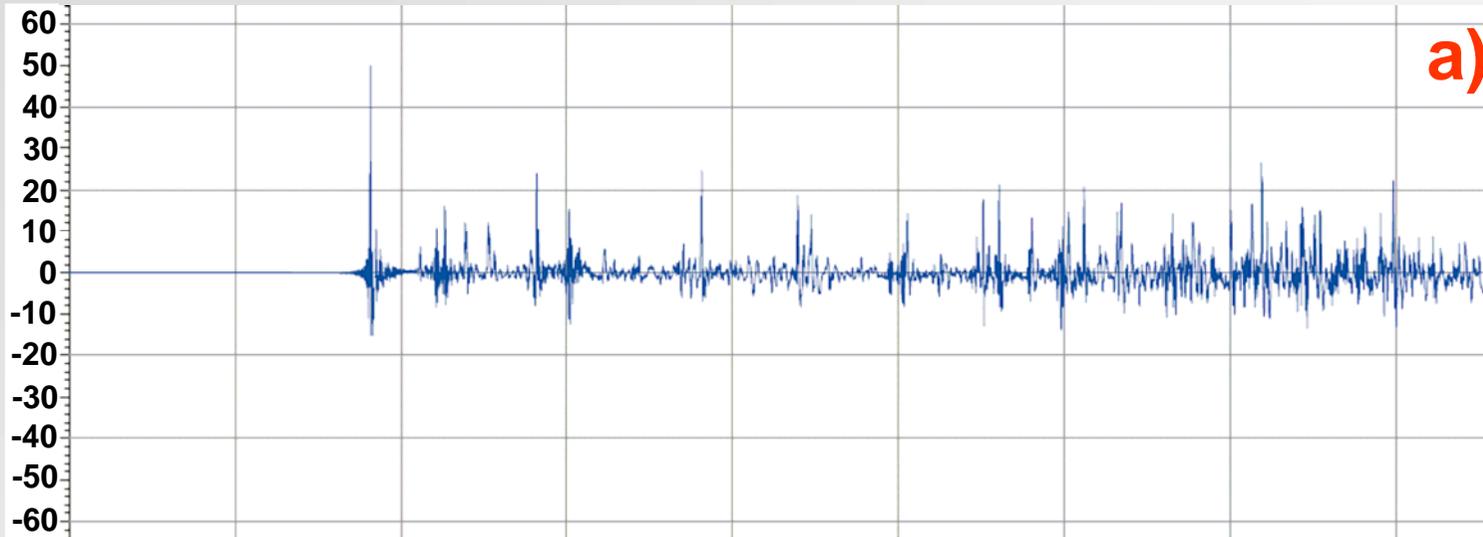


Disposizione del punto sorgente **S1** e ricevitore **P5** in un salone a pianta rettangolare per il calcolo e la misura della frazione energetica laterale  $J_{LF}$



**L'angolo di incidenza del suono non è casuale, ma è compreso in una fascia limitata in quanto è legato alla posizione della sorgente sul palco**

## *La riflessione speculare*



**Indicazione della prima riflessione sulla parete piana.  
Risposta all'impulso **calcolata a)** e **misurata in sala b)**.**

## La riflessione speculare

La presenza degli unici elementi diffondenti (finestre e poltrone) e la forma a botte della volta si traducono, nel modello, in coefficienti di scattering non noti a priori.

Si simulano due scenari ove i valori dei coefficienti di scattering assegnati alle pareti laterali sono minimi e massimi.

Si confrontano i risultati di misurazioni di  $T30$  e  $J_{LF}$  nella sala a pareti parallele e lisce con i valori ottenuti dalla simulazione con modello geometrico

	<b>T30 [s]</b>	<b>Frazione <math>J_{LF}</math> [-]</b>
Valori misurati in sala	2.98	0.24
Valori desunti con scattering ridotto	2.95	0.28
Valori desunti con scattering elevato	2.95	0.25

## La riflessione speculare

Si osserva una buona corrispondenza dei valori medi del **tempo di riverberazione** che, sostanzialmente, cambia poco se si introducono valori di scattering delle pareti laterali minimi (10%) e massimi (90%)

---

Il modello di simulazione indica che la **frazione energetica laterale** per S1 → P5 si riduce di poco aumentando significativamente il coefficiente di scattering in quanto passa da  $J_{LF} = 0,28$  a  $J_{LF} = 0,25$  (*differenza = 0.03*)

---

La **minima differenza percepita** per  $J_{LF}$  è pari a 0,05 per cui si potrebbe dedurre che l'effetto di un elemento estremamente diffondente posto sulle pareti laterali piane non verrebbe minimamente percepita da un ascoltatore in prossimità delle pareti.

## La riflessione speculare

La forma in pianta di una sala (rettangolare, a ventaglio, etc.) influenza i valori di  $J_{LF}$  nel senso che le pareti laterali e parallele determinano un incremento dell'energia riflessa lateralmente con valori più elevati del parametro. Si percepiscono, però, fenomeni collaterali indesiderati, quali un effetto di eccessivo spostamento laterale di sorgenti direttive (trombe, etc.) colorazioni timbriche, etc.

Si analizza il caso relativo alla progettazione e successiva verifica sperimentale del teatro Carbonetti, a pianta rettangolare, recuperato nel comune di Broni (Pavia). Per evitare i problemi legati ad eccessive e concentrate riflessioni sulle pareti laterali piane si disegnano due pareti sagomate per aumentare la diffusività nell'area occupata dal pubblico in platea ed in galleria, con l'accortezza che nei punti più distanti dal palco le riflessioni laterali provengano, in maggior numero, dalle pareti laterali più vicine alla scena.

## *Progettazione volta ad aumentare l'ampiezza apparente della sorgente*



**La sala progettata e realizzata presenta importanti elementi diffondenti sulle pareti laterali**

## *Progettazione volta ad aumentare l'ampiezza apparente della sorgente*



**Vista del palco dalla galleria**

## ***Progettazione volta ad aumentare l'ampiezza apparente della sorgente***

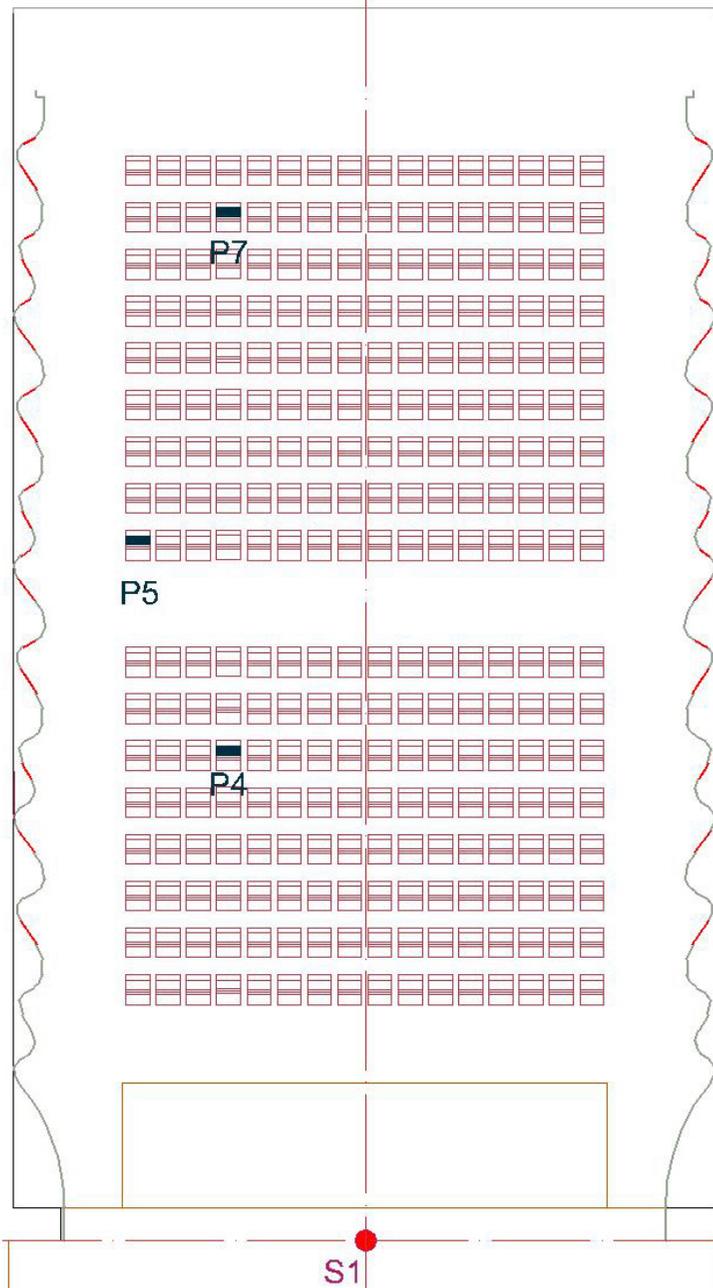
**L'idea del progettista acustico è quella di conseguire una risposta polare della diffusione non uniforme, ma con lobi rivolti verso i punti più distanti dalla scena.**

**In questo modo si può compensare la ridotta spazialità della sorgente nei posti più lontani con un aumento della diffusione prodotta dalle pareti laterali più prossime alla scena.**



**Il modello geometrico in 3D realizzato per la progettazione, seppure completo del disegno dei diffusori sulle pareti laterali, non è in grado di rappresentare il comportamento del campo sonoro prodotto per diffusione delle pareti laterali**

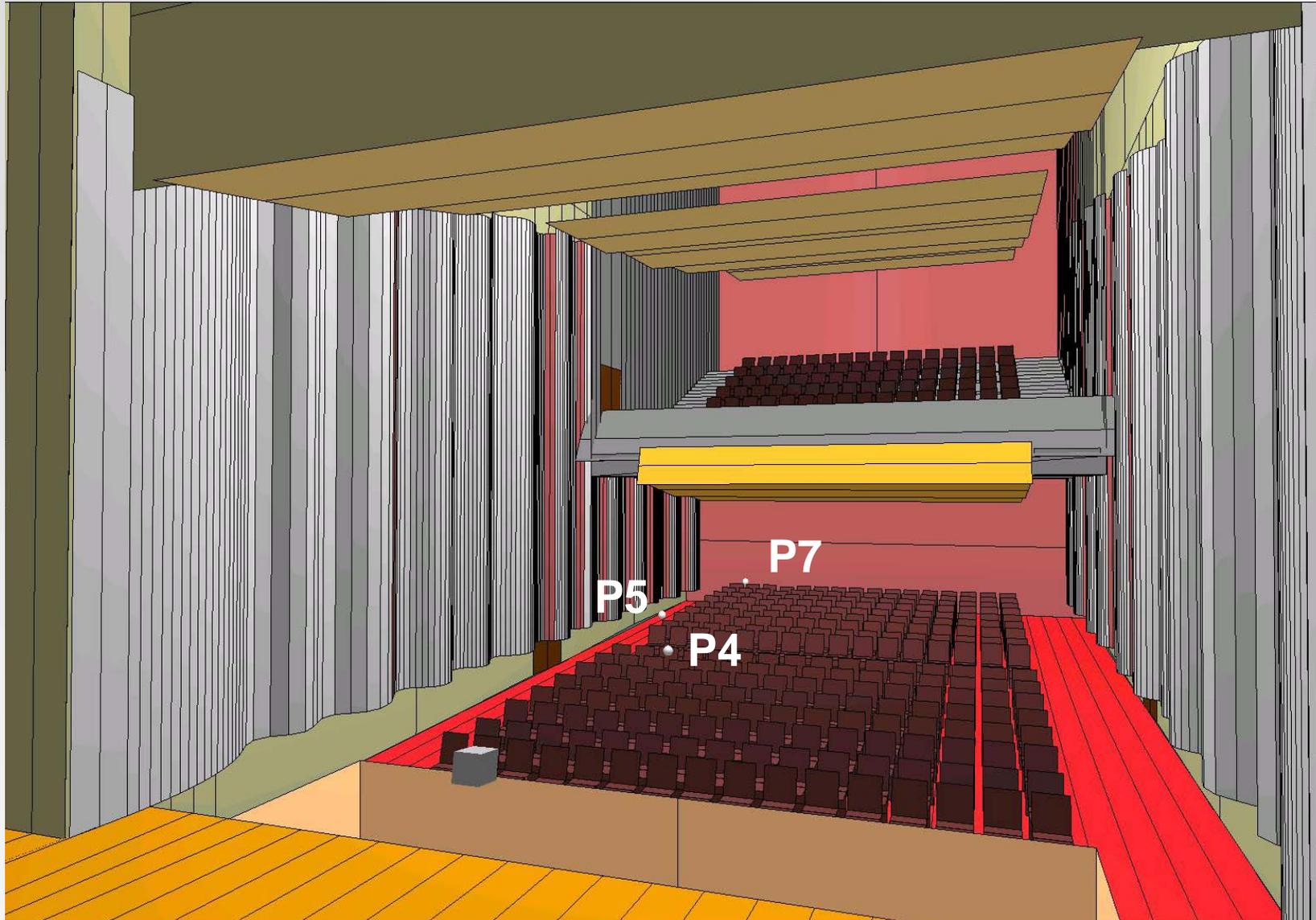
## Progettazione volta ad aumentare l'ampiezza apparente della sorgente



Si realizzano, sulle pareti laterali, delle onde che presentano una profondità media variabile di 0.46 m e che è paragonabile a  $\frac{1}{4}$  di lunghezza d'onda di un suono di frequenza pari a  $f = 190$  Hz. La lunghezza dell'onda che si ripete con periodicità è pari a 1.45 m ed è compatibile con la frequenza di  $f = 290$  Hz, che risulta il limite inferiore al di sotto del quale prevale la riflessione speculare.

**Pianta della platea con indicati i punti di misura P4;P5;P7 utilizzati per le simulazioni**

## *Progettazione volta ad aumentare l'ampiezza apparente della sorgente*



**Modello in 3D con indicati i punti di misura e  
simulazione P4;P5;P7 utilizzati per le simulazioni**

## Progettazione volta ad aumentare l'ampiezza apparente della sorgente

Si confrontano il valore calcolato ipotizzando pareti laterali piane ed ondulate con i valori realmente misurati. La sorgente è in S1.

	Tempo di riverberazione $T_{30}$ [s]			frazione energetica laterale $J_{LF}$ [-]		
	P4	P5	P7	P4	P5	P7
Valori misurati in sala	1,0	0,9	1,0	0,19	0,12	0,16
Valori desunti dal modello con <b>pareti piane</b>	1,8	1,7	1,7	0,33	0,34	0,26
Valori desunti dal modello <b>pareti ondulate</b>	1,3	1,2	1,2	0,21	0,22	0,18

### Risultati di misurazioni di T30 e JLF e valori stimati dal modello

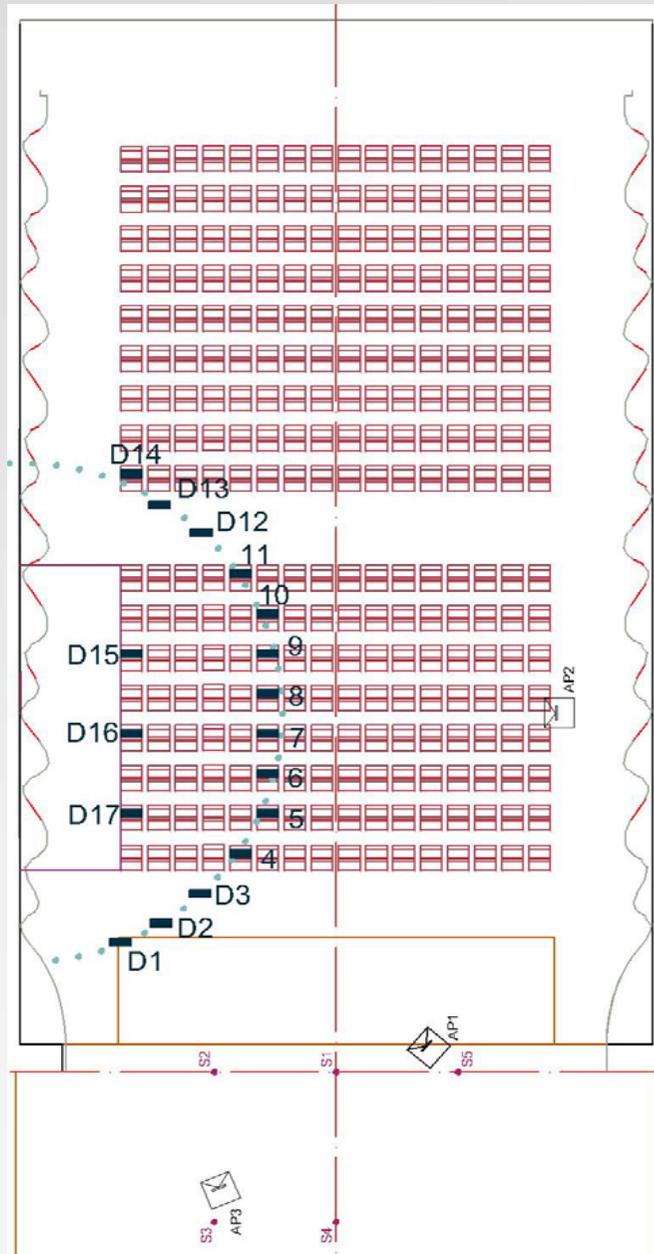
La formazione di un campo sonoro più diffuso porta ad una riduzione del tempo di riverberazione. La maggiore energia sonora diffusa dalle pareti laterali riduce le differenze del parametro di spazialità  $J_{LF}$  nei punti P4 (più vicino alla scena), P5 (al centro della sala e più vicino alla parete laterale) e P7 (più lontano e sotto la balconata).

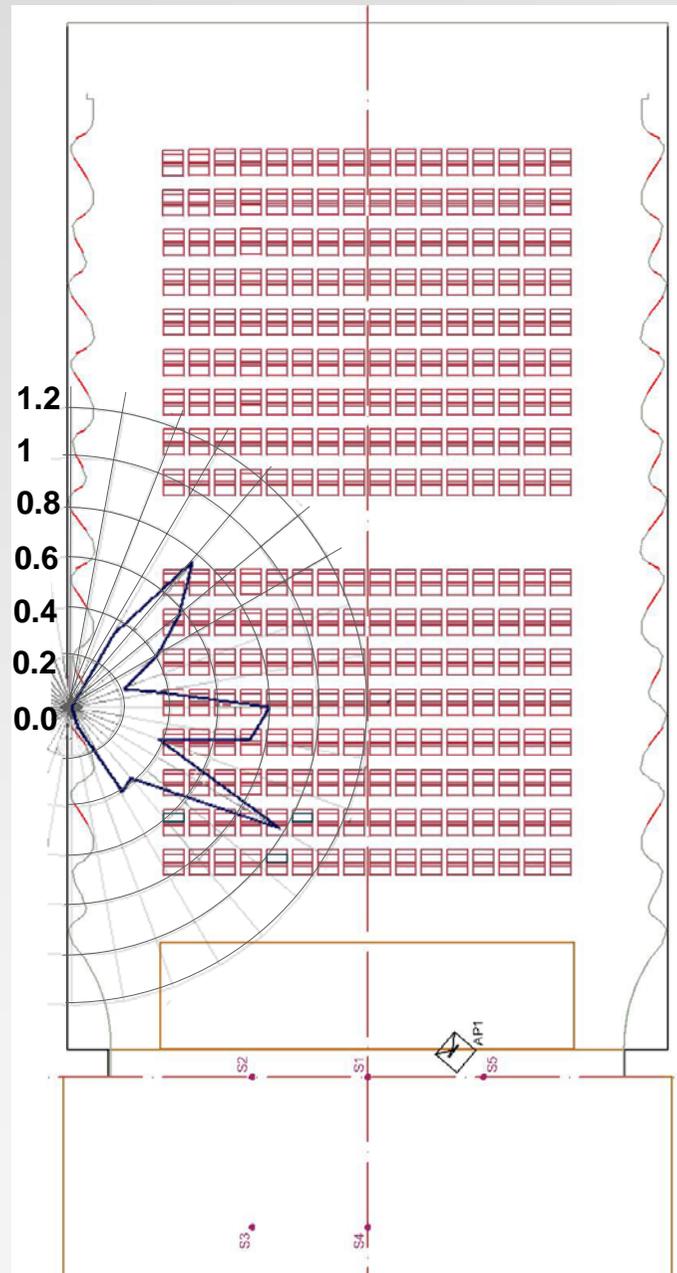
## Posizione degli altoparlanti e dei punti di misura

Si utilizza un microfono con diagramma polare omnidirezionale commutabile a cardioide. L'asse di massima sensibilità è rivolto verso il punto ideale O

Si determina la risposta all'impulso tra altoparlante e punti di ricezione commutando il microfono da omnidirezionale  $h_1(t)$  e risposta polare a cardioide

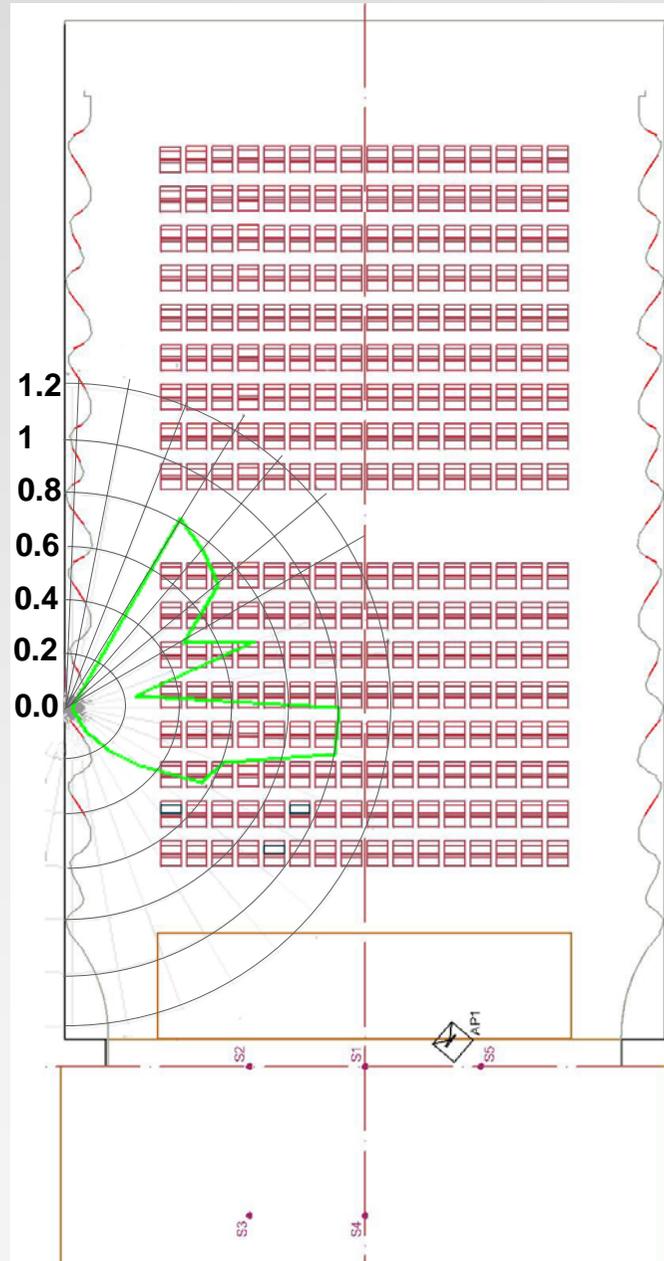
Si determina la risposta all'impulso tra altoparlante e punto di ricezione inserendo tra microfono e parete un pannello fonoisolante e fonoassorbente per ridurre (idealmente eliminare) le riflessioni sulla parete ondolata  $h_2(t)$



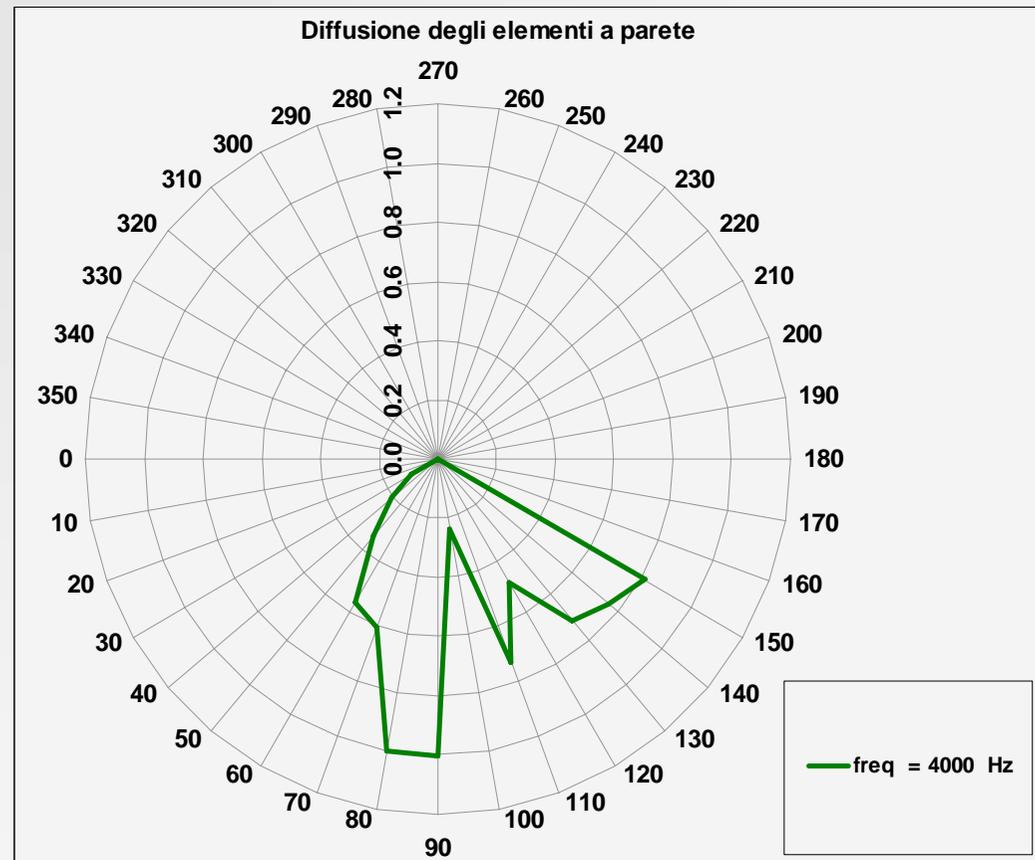


### Diagramma polare della diffusività alla frequenza di 500 Hz

Si individua, con la risposta a cardioide del microfono, la finestra  $T = t_2 - t_1$  che contiene l'energia diffusa dalla parete. Si calcola l'energia contenuta nella finestra  $T$  della risposta all'impulso  $h_3$  e si rapporta tale energia a quella diretta che perviene al microfono



## Diagramma polare della diffusività alla frequenza di 4000 Hz



# Conclusioni

**Il controllo dei valori del parametro  $J_{LF}$  in sede di progettazione non è possibile utilizzando i valori dei coefficienti di scattering sulle pareti laterali.**

**Occorre poter inserire, nel modello, il diagramma di diffusione polare di strutture aggiunte sulle pareti laterali se si ritiene utile mantenere un valore appropriato del parametro sia in prossimità delle pareti sia nei punti più lontani dalla scena.**

**Resta il problema della conoscenza del diagramma polare della diffusività della struttura. Può essere risolto con errore significativo mediante prove su modello fisico dell'elemento.**