

## **INTRODUZIONE**

L'obiettivo di questo lavoro è illustrare l'analisi dello stato di fatto e la progettazione degli interventi di correzione acustica della torre dell' ex Carico dell'Acqua di Budrio, nella prospettiva di renderla utilizzabile come sala polifunzionale.

La norma tecnica ISO 3382-1 [8] delinea criteri generali per l'analisi qualitativa degli ambienti di ascolto.

Il capitolo 1 presenta un panorama sintetico sull'acustica architettonica, con particolare riferimento ai descrittori acustici riportati nella ISO 3382 e riporta cenni teorici sulla simulazione numerica.

Nel capitolo 2 sono descritte in dettaglio le misurazioni all'interno dell'ambiente. Sono indicate inoltre motivazioni tecniche e teoriche riguardo i metodi di analisi. I valori misurati sono successivamente confrontati con i valori ricavati mediante simulazione numerica realizzata con un software previsionale.

La realizzazione e la successiva taratura del modello numerico chiudono il capitolo 2.

Il capitolo 3 relaziona in merito agli interventi proposti di correzione acustica.

Attraverso il modello tridimensionale tarato si eseguono simulazioni numeriche di diversi interventi di correzione acustica fino a definire una rosa di possibili soluzioni che realizzino gli obiettivi qualitativi riportati nella ISO 3382.

Materiali e geometrie sono riportati in dettaglio, insieme ad una esauriente mappatura acustica dell'ambiente, dallo stato di fatto alla progressiva ottimizzazione acustica.

## **CAPITOLO 1**

### **RICHIAMI DI ACUSTICA ARCHITETTONICA**

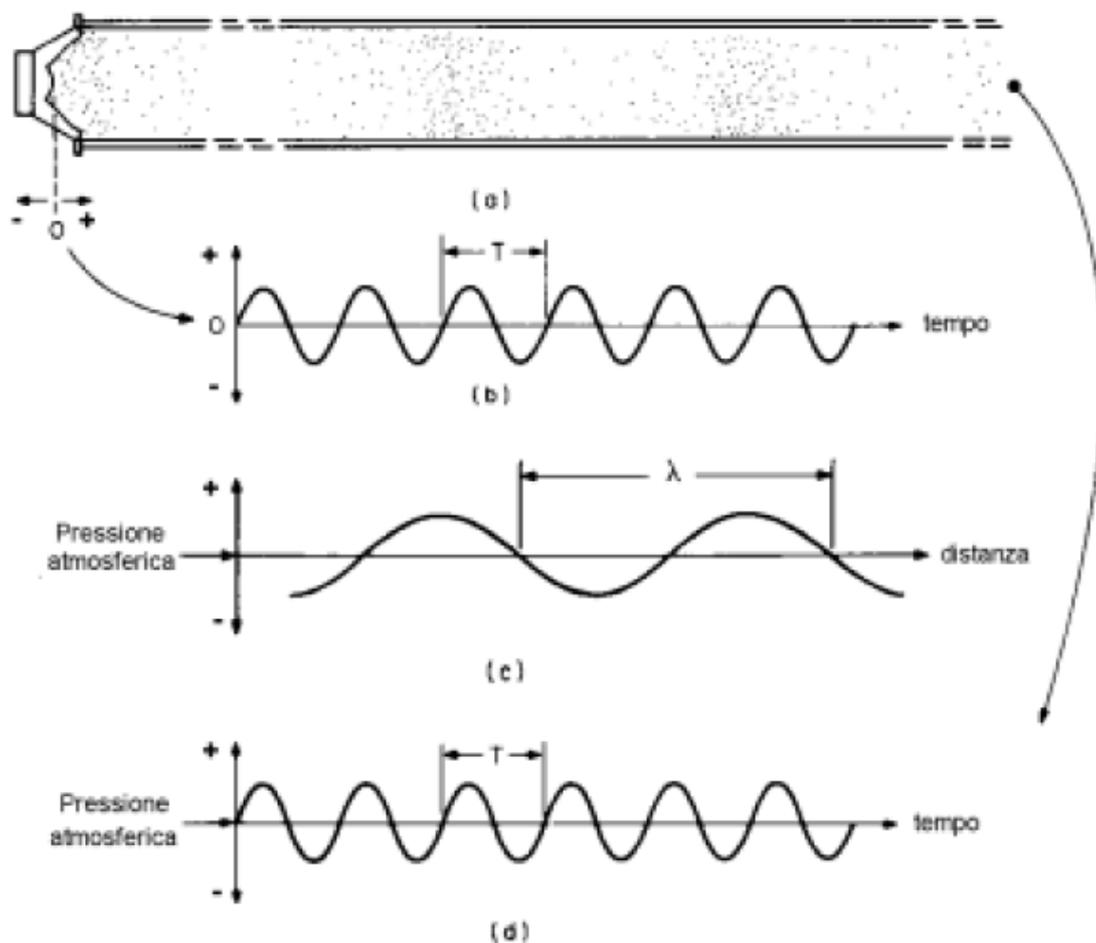
#### **1.1 ONDE SONORE**

Il suono si propaga nel mezzo elastico tramite onde di pressione.

La sorgente sonora, cioè un corpo in vibrazione, trasmette al mezzo sollecitazioni di pressione al di sopra e al di sotto del valore della pressione atmosferica: si parla di onde di compressione e di rarefazione.

Le particelle del mezzo, sollecitate, oscillano attorno alla loro posizione di riposo, dando origine a trasformazioni della loro energia potenziale elastica in energia cinetica e viceversa. Nel mezzo di propagazione si ha quindi una perturbazione di pressione, la cui velocità è chiamata velocità del suono. L'orecchio umano interpreta come stimoli auditivi solo fluttuazioni di pressione che vanno da 20 a 20000 cicli per secondo o Hertz (Hz).

Un esempio di generazione delle onde sonore è illustrata nella figura 2.1.a, che mostra un condotto rettilineo con un pistone ad un suo estremo; questa schematizzazione può essere realizzata in pratica con un tubo che monta un altoparlante ad un suo estremo. Inizialmente l'aria all'interno del tubo è tutta alla pressione atmosferica; quando la membrana dell'altoparlante si muove rapidamente in avanti comprime l'aria a contatto con la sua superficie. Questa compressione viene rapidamente propagata allo strato di aria adiacente e da lì a quello successivo; non appena uno strato cede la sua energia a quello successivo ritorna al suo stato di pressione originario. Quello che osserviamo all'interno del condotto è fronte d'onda, che si propaga alla velocità del suono  $c$  pari a circa 340 m/s.



**Fig. 1.1 :** (a) Un altoparlante fissato all'estremità di un tubo genera un'onda sonora sinusoidale. (b) Rappresentazione dello spostamento del diaframma attorno alla sua posizione di equilibrio nel tempo. (c) Distribuzione istantanea delle variazioni di pressione lungo il tubo. (d) Variazione della pressione al variare del tempo in un punto interno al tubo.

La maggior parte dei suoni che noi studiamo è di tipo periodico. Il più semplice suono periodico è un tono puro come quello emesso da un diapason. Immaginiamo che la membrana dell'altoparlante dell'esempio precedente si muova con legge sinusoidale attorno alla sua posizione di equilibrio; se il primo movimento del diaframma è in avanti si genera una prima onda di compressione. Quando la membrana cambia direzione la pressione dello strato d'aria ad essa adiacente scende al di sotto della pressione atmosferica:

anche quest'onda di rarefazione si propaga con modalità simili a quelle già descritte nel caso della compressione. Questo ciclo di compressione e rarefazione è ripetuto, cosicché l'onda sonora che si propaga nel condotto ha una forma periodica. Riportando in un diagramma l'andamento della pressione dell'aria al variare della distanza dall'altoparlante (Fig. 1.1.c) troviamo un andamento di tipo sinusoidale il cui periodo è detto *lunghezza d'onda* ( $\lambda$ ). Se si misura la variazione di pressione nel tempo in un qualunque punto del tubo (Fig. 1.1.d) si ha ancora un andamento periodico di *periodo*  $T$ ; l'inverso del periodo è la *frequenza*  $f$  dell'onda sonora. La lunghezza d'onda ed il periodo (e quindi la frequenza) sono legate fra loro per mezzo della velocità del suono:

$$\lambda = ct \quad (1.1)$$

Sapendo che  $f = 1/T$ , possiamo scrivere le equazioni seguenti:

$$\lambda = c/f, \quad f = c/\lambda, \quad c = f\lambda \quad (1.2)$$

Quando due suoni hanno frequenze  $f_1$  e  $f_2$  definiscono una banda di ampiezza pari a  $\Delta f = f_2 - f_1$  e se il loro rapporto  $f_2 / f_1$  è pari a 2, cioè una frequenza è doppio dell'altra, il loro intervallo è chiamato banda di ottava o banda critica.

Il campo sonoro può essere suddiviso in 10 bande di ottava.

Le bande di ottava sono centrate nelle frequenze che sono elencate nella prima riga della tabella 1.2 a cui corrispondono le lunghezze d'onda che sono invece nella seconda riga della stessa tabella.

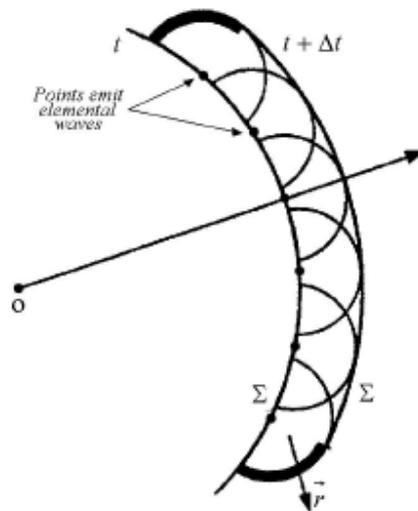
$f$ [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$\lambda$ [m]	5.302	2.672	1.336	0.668	0.334	0.167	0.084	0.042

**Tabella 1.1: Frequenze centrali delle bande di ottava e le loro lunghezze d'onda corrispondenti.**

Matematicamente la propagazione del suono è descritta dall'equazione delle onde, Eq.(1.3) conosciuta come equazione di D'Alembert dove  $p$  [Pa] è la pressione mentre  $x, y, z$  sono le coordinate cartesiane.

$$c^2 \Delta p = c^2 \left( \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1.3)$$

Inoltre la propagazione del suono nell'aria è illustrata da Huygens: il fronte d'onda  $\Sigma$  avanza come se ognuno dei suoi punti emettesse delle onde sferiche elementari dato che il fronte d'onda dopo un intervallo di tempo è proprio lo sviluppo di queste onde elementari.



**Figura 1.2: Principio di Huygens. Propagazione di un fronte d'onda.**

Nell'ipotesi di una sorgente puntiforme il suono si diparte da essa con un fronte d'onda sferico avente per centro la sorgente e raggio crescente con l'avanzare del fronte d'onda.

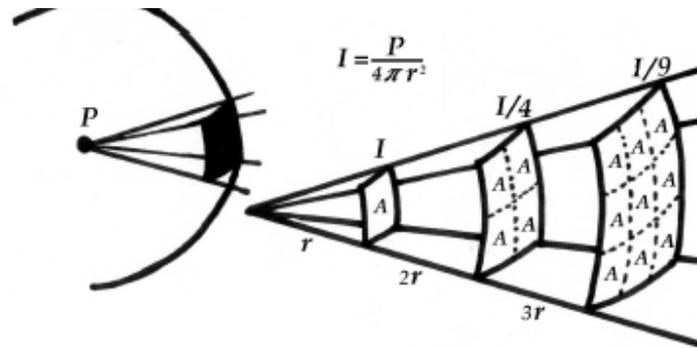
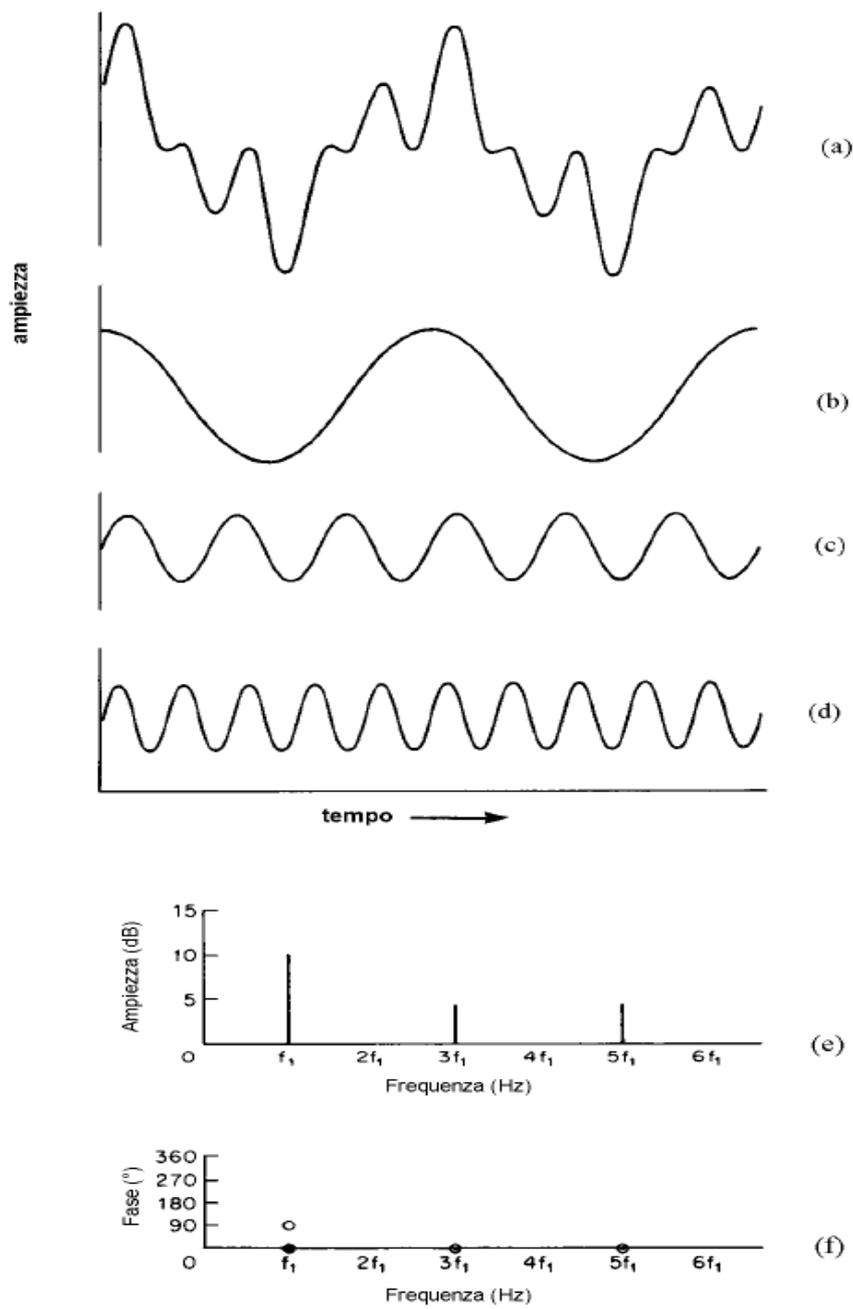


Figura 1.3: Legge della divergenza geometrica per la propagazione del suono.

In termini pratici ciò significa che raddoppiando la distanza dalla sorgente si ottiene un'attenuazione del livello di intensità sonora di 6 dB.

### 1.1.1 SUONI COMPLESSI

Finora abbiamo trattato onde sinusoidali ma i suoni che noi percepiamo sono molto più complessi. Anche un suono complesso può essere periodico; se scomponiamo tale suono nelle sue componenti fondamentali scopriamo che esso è dato dalla combinazione di diverse forme d'onda sinusoidali che stanno fra loro in relazione *armonica*, ovvero hanno lunghezze d'onda che sono multipli interi della frequenza *fondamentale*, che è quella avente periodo maggiore (Fig. 1.4). L'andamento nel tempo di una forma d'onda complessa dipende dall'*ampiezza* relativa delle componenti armoniche e della fondamentale e dalla posizione temporale di ogni armonica rispetto alle altre, ovvero dalla loro *fase*. La fase ha la dimensione di un angolo.

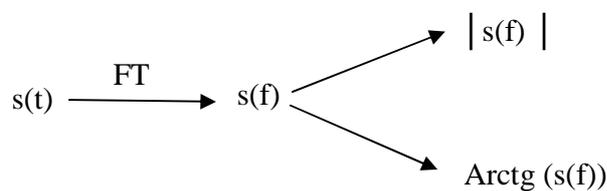


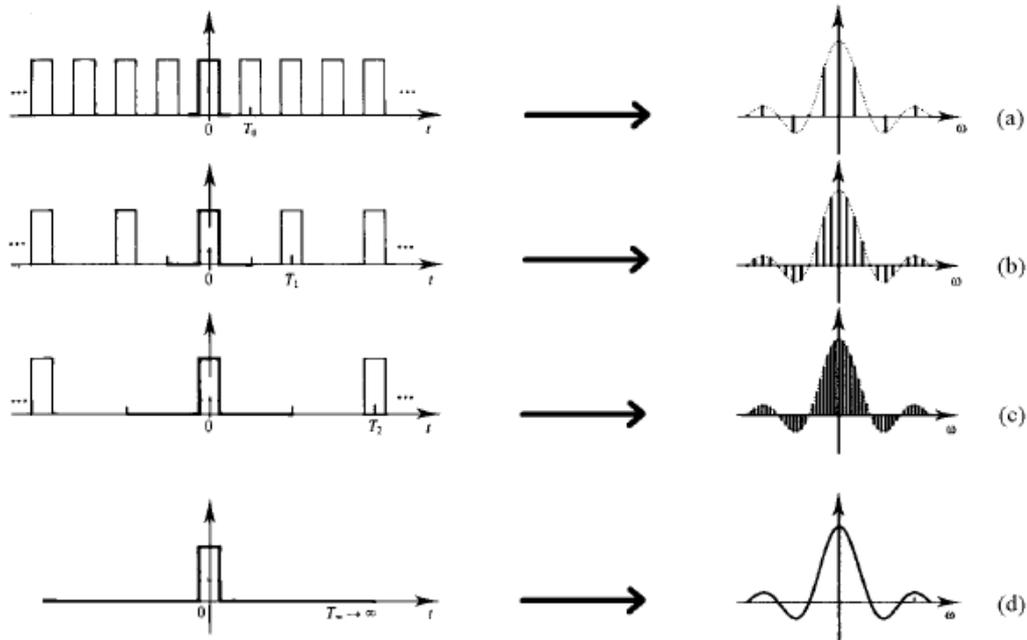
**Fig. 1.4 :** (a) Una forma d'onda periodica complessa. (b),(c),(d) Le componenti armoniche sinusoidali nelle quali è possibile scomporre tale forma d'on-da. (e) Lo spettro di ampiezza e (f) lo spettro di fase.

### 1.1.2 SPETTRO DI AMPIEZZA E DI FASE

Il campo sonoro udibile umano si estende dai 20 Hz ai 20 kHz e l'orecchio non è in grado di percepire tutte le frequenze allo stesso modo quindi si è interessati a valutare non tanto il livello sonoro complessivo, cioè l'energia totale del suono, bensì la sua distribuzione alle varie frequenze; infatti i fenomeni acustici sono *fenomeni tipicamente spettrali*, ovvero i loro effetti sono funzione della frequenza oltre che del contenuto energetico.

Le informazioni relative alla composizione di un suono complesso possono essere rappresentate in un diagramma ampiezza/frequenza che prende il nome di *spettro di ampiezza* (Fig. 1.4.e). Nello spettro ogni linea rappresenta una differente armonica del suono complesso: l'ampiezza dell'armonica è data dall'altezza della linea, mentre la sua frequenza è data dalla posizione della linea sull'asse delle ascisse. Le informazioni riguardanti la fase delle varie armoniche sono contenute nel diagramma dello *spettro di fase* (Fig. 1.4.f). La rappresentazione della forma d'onda nel dominio del tempo è equivalente a quella riportata nel dominio delle frequenze. Le prove di questa importante considerazione sono state fornite da Fourier: la separazione di una forma d'onda complessa nelle sue componenti sinusoidali si dice *analisi di Fourier*, mentre il procedimento inverso, che mi permette di ricostruire (sintetizzare) la forma d'onda si dice *sintesi di Fourier*. Il processo che permette di convertire le informazioni dal dominio del tempo a quello della frequenza e viceversa si dice *trasformazione di Fourier*. Nel seguente esempio è possibile capire la relazione fra le due rappresentazioni:





**Fig. 1.5 : Rapporto fra lo spettro di ampiezza di un'onda periodica ed il suo periodo: all'aumentare del periodo le linee dello spettro si fanno sempre più ravvicinate, fino alla situazione limite di un unico impulso aperiodico.**

Consideriamo una forma d'onda qualsiasi caratterizzata da un certo periodo (Fig. 1.5.a): lo spettro di questa onda consiste, come è già stato accennato, in una serie armonica di componenti. Aumentando la frequenza della forma d'onda diminuisce il periodo, cosicché i picchi periodici vengono a trovarsi più vicini nel dominio del tempo; nel dominio della frequenza invece la fondamentale si sposterà verso destra e le armoniche resteranno sempre spaziate fra loro di multipli interi della frequenza fondamentale (Fig. 1.5.b e Fig. 1.5.c). L'effetto globale di un aumento della frequenza è quindi un aumento della distanza fra le varie armoniche, così come al diminuire della frequenza la loro distanza diminuisce. Portando questo ragionamento al limite, distanziando infinitamente i picchi ( $T \rightarrow \infty$ , ovvero  $f = 0$ ) lo spazio fra le armoniche svanisce (Fig. 1.5.d). Possiamo dunque affermare che un impulso discontinuo o aperiodico ha uno spettro continuo.

### 1.1.3 GRANDEZZE ACUSTICHE

Per la propagazione del suono è necessaria una certa energia per ottenere uno spostamento delle particelle d'aria attorno alla loro posizione d'equilibrio. Per ottenere un raddoppio dello spostamento occorre raddoppiare la differenza di pressione, ovvero raddoppiare la forza impressa alle particelle; dal momento che il lavoro è il prodotto della forza per la distanza l'energia sonora è proporzionale al quadrato dello spostamento delle particelle d'aria oppure, in termini più corretti, al quadrato della pressione sonora  $p$  (che si misura in Pascal).

L'energia sonora viene proiettata dalla sorgente nello spazio circostante ad essa; l'energia trasmessa nell'unità di tempo si dice potenza sonora  $P$  (misurata in Watt), mentre la potenza sonora che attraversa una superficie di area unitaria perpendicolarmente ad una direzione data si dice intensità sonora  $I$  (misurata in  $\text{W/m}^2$ ): anche l'intensità sonora è proporzionale al quadrato della pressione sonora.

Un'altra importante grandezza è la densità di energia sonora  $D$ , definita come l'energia sonora che, in un dato istante, risulta localizzata nell'unità di volume circostante ad un punto assegnato del mezzo di propagazione. Poiché tale definizione, diversamente da quella di intensità, non fa riferimento ad una direzione di propagazione, il suo uso è concettualmente corretto anche quando nella zona di spazio in esame coesistono contemporaneamente più onde sonore che si propagano in direzioni diverse, come avviene spesso negli ambienti chiusi.

Le grandezze sopra citate non vengono mai espresse per mezzo del loro valore bensì come logaritmo del rapporto fra il loro valore ed un valore di riferimento fissato convenzionalmente; tale rapporto si misura in decibel (dB):

$$I = 10 \log \frac{I_1}{I_{rif}} \quad (1.4)$$

$$P = 10 \log \frac{P_1}{P_{rif}} \quad (1.5)$$

$$p = 10 \log \frac{p_1^2}{p_{rif}^2} = 20 \log \frac{p_1}{p_{rif}} \quad (1.6)$$

Per quel che riguarda la pressione sonora, qualora la pressione  $p_1$  venga rapportata alla pressione di riferimento  $p_{rif}=20\mu\text{Pa}$ , prende il nome di *livello di pressione sonora* e si indica con SPL (*sound pressure*).

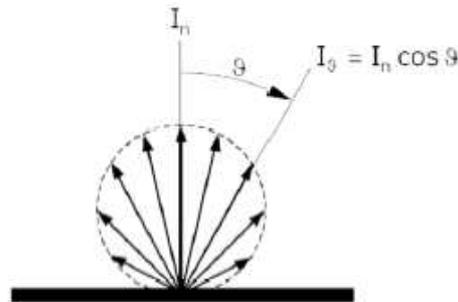
#### 1.1.4 RIFLESSIONE

Una sorgente sonora che non sia in presenza di alcun ostacolo si dice in campo libero perché può irradiare le onde sonore in qualsiasi direzione senza che queste vengano deviate o modificate. Nella grande maggioranza dei casi le onde sonore incontrano degli ostacoli sul loro percorso in modo che la loro naturale propagazione viene modificata.

Il fenomeno è di natura ondulatoria e dipende dalla lunghezza d'onda.

Se le dimensioni dell'ostacolo o di una qualsiasi superficie sono grandi rispetto alla lunghezza d'onda dell'onda sonora e le irregolarità presenti sulla superficie sono molto piccole sempre rispetto alla lunghezza d'onda, e cioè la superficie stessa appare "liscia", l'interazione tende alla riflessione speculare.

Se la superficie non è sufficientemente liscia ma presenta un certo numero di irregolarità di dimensioni paragonabili alla lunghezza d'onda allora la riflessione è diffusa (diffusione) e, nel caso ideale, segue la legge di Lambert o legge del coseno. Nella realtà possiamo avere diverse forme come illustrato in figura 1.9.



Superficie lambertiana:  $I_\theta = I_n \cos \theta$

Figura 1.6: Legge di Lambert o legge del coseno.

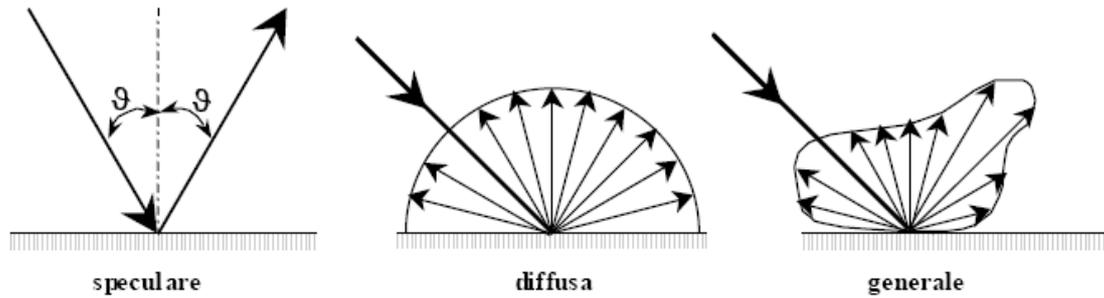


Figura 1.7 : Iterazioni dell'onda con una superficie.

È interessante considerare il caso di una riflessione regolare su superfici lisce rispettivamente concave o convesse. Si osservi come, nel primo caso, si verifichi una concentrazione dei fronti d'onda, mentre nel secondo caso si abbia una loro dispersione su un'area più ampia.



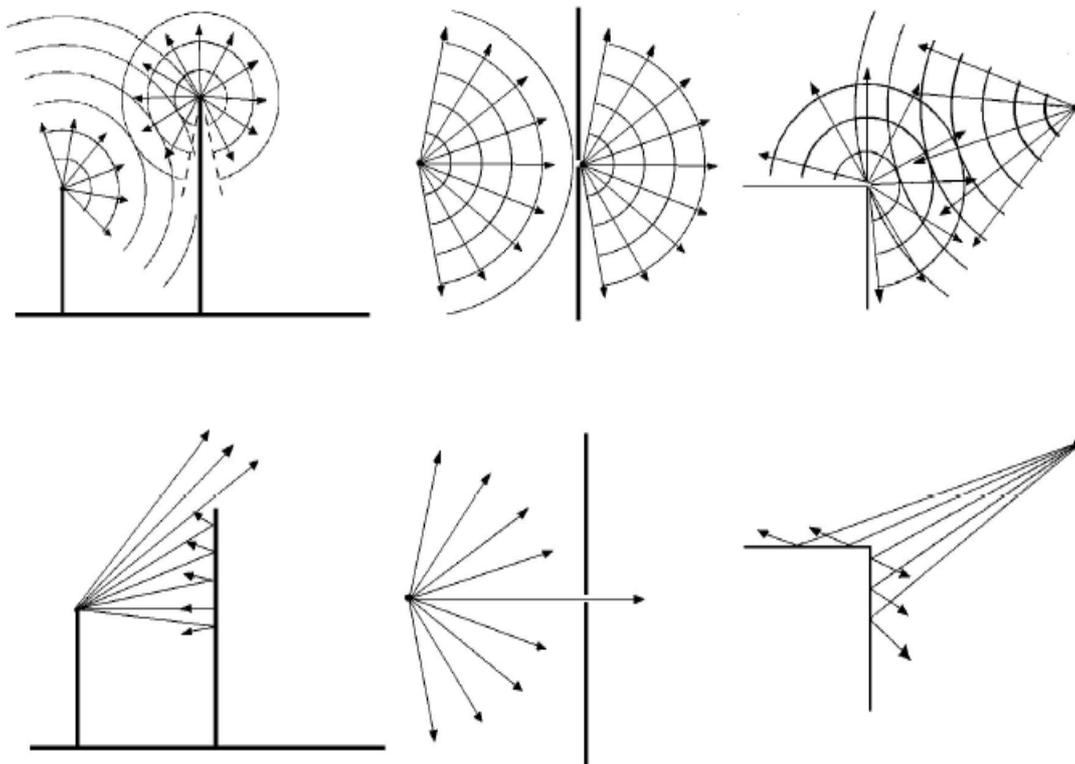
Figura 1.8: Riflessione su superficie concava (concentrazione dei fronti d'onda) e superficie convessa (dispersione dei fronti d'onda)

### 1.1.5 DIFFRAZIONE

Quando un'onda sonora incontra un ostacolo, che è più piccolo rispetto alla sua lunghezza d'onda, si comporta come se l'ostacolo non esistesse formando una piccola zona d'ombra.

Al contrario se la frequenza del suono è sufficientemente alta e la lunghezza d'onda è perciò breve, si forma una zona d'ombra notevole.

Gli effetti dovuti alla diffrazione possono essere suddivisi in tre gruppi: quelli dovuti alla presenza di una barriera, quelli causati da uno spigolo e gli ultimi dovuti ad una apertura.



**Figura 1.9: Diffrazione dovuta ad un barriera che causa la presenza del suono dietro alla barriera stessa; diffrazione causata da un'apertura con perdita di energia; diffrazione per la presenza di uno spigolo o di un angolo con conseguente riflessione o diffusione.**

### 1.1.6 INTERFERENZA

Consideriamo due onde sonore della stessa ampiezza e frequenza che giungono ad un ricevitore da due direzioni differenti: se le onde hanno pure la stessa fase il risultato è un'onda di ugual frequenza ed ampiezza doppia (*interferenza costruttiva*), mentre se le due onde sono *fuori fase* fra loro (ovvero sfasate di  $180^\circ$ ) il risultato è la perfetta cancellazione reciproca (*interferenza distruttiva*). Nei casi di interesse pratico si verifica interferenza fra l'onda diretta proveniente dalla sorgente e le varie componenti riflesse che giungono ad un determinato ascoltatore; in questo caso l'ampiezza dell'onda riflessa è minore di quella diretta a causa dell'energia assorbita dalla superficie e dall'attenuazione dovuta alla divergenza geometrica a causa della maggior distanza percorsa. Il tipo di interferenza (distruttiva o costruttiva) dipende dalla differenza di fase creata dal differente percorso delle due onde ovvero dal rapporto fra la differenza di distanza percorsa e la metà della lunghezza d'onda: se tale rapporto è un numero intero pari allora l'interferenza è costruttiva, se il rapporto è un intero dispari l'interferenza è di tipo distruttivo.

## 1.2 CAMPO ACUSTICO ALL'INTERNO DI SPAZI CHIUSI

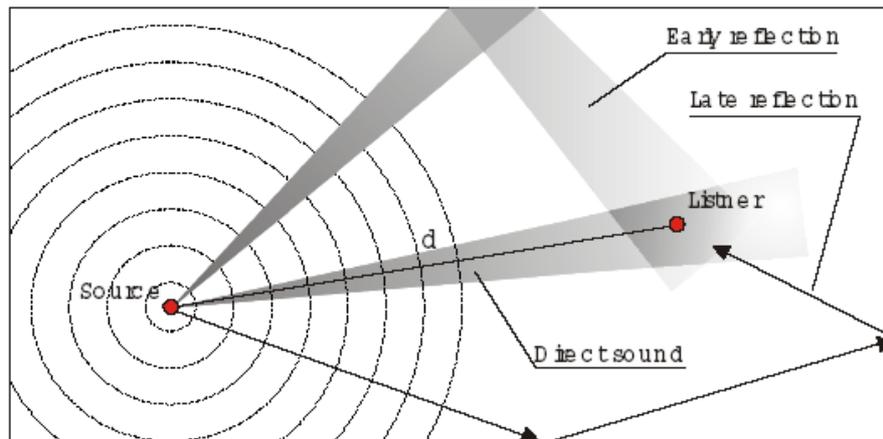
Il campo acustico in un ambiente fisicamente confinato differisce da quello di uno spazio aperto per la presenza, accanto alle onde sonore dirette (sorgente-ascoltatore), di onde sonore riflesse in vario modo dalle superfici delimitanti l'ambiente.

Gli elementi presenti all'interno di un ambiente chiuso (pareti, arredamenti, persone, ecc.) condizionano la propagazione acustica con effetti importanti sull'acustica dell'ambiente stesso poiché assorbono in diversa misura l'energia sonora che incide su di loro.

Il primo fronte d'onda emesso da una qualsiasi sorgente che colpisce le orecchie dell'ascoltatore viene definito suono diretto ed è quel suono che ha viaggiato senza subire l'influenza dell'ambiente esterno, né assorbimento né riflessione, in quanto ha percorso la minima distanza possibile tra sorgente e ricevitore.

I fronti d'onda successivi costituiscono il campo riverberante e sono dovuti al complesso delle interazioni che l'onda sonora subisce a causa delle superfici che delimitano l'ambiente

o degli oggetti in esso contenuti per cui, oltre alle caratteristiche della sorgente, assume importanza l'attitudine delle superfici e degli oggetti presenti a riflettere il suono. In prossimità della sorgente è prevalente quello diretto mentre a distanza prevale quello riverberante (diffuso).

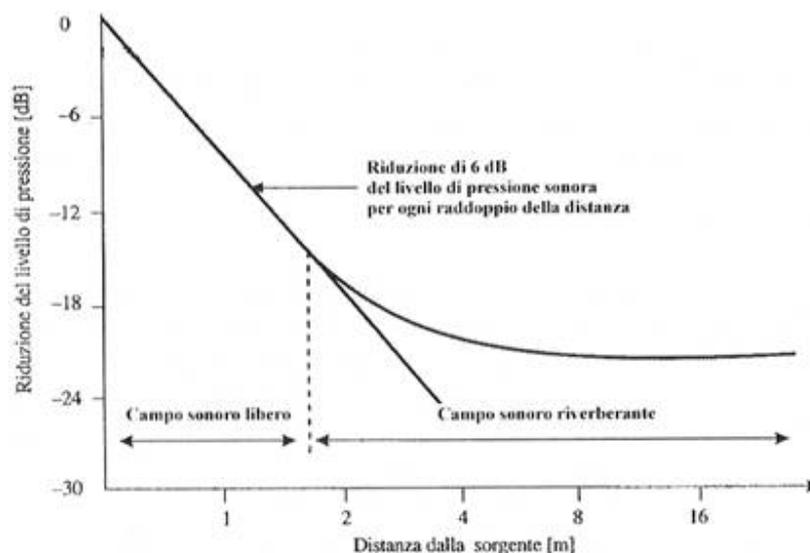


**Figura 1.10: Propagazione del suono all'interno di una stanza a forma rettangolare.**

L'onda diretta si comporta in maniera analoga alla propagazione sonora in campo libero, ossia decade per semplice divergenza geometrica, con una riduzione di 6 dB ad ogni raddoppio della distanza.

Il suono diretto è caratterizzato da un'intensità acustica inversamente proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente (vedi figura 1.12) e viene contemporaneamente integrato dalle prime riflessioni provenienti dalle superfici delimitanti.

Per il suono riverberato si distinguono le prime riflessioni, che pervengono all'ascoltatore entro poche decine di millisecondi dopo il suono diretto e che contribuiscono insieme a questo a costituire il segnale utile, da successive che risultano mascheranti. Il campo sonoro totale che tende a stabilirsi in un ambiente chiuso è dato quindi dalla combinazione del campo sonoro diretto e del campo riverberante.



**Figura 1.11: Riduzione sonora risultante dalla sovrapposizione dei due campi in funzione della distanza.**

Il decadimento sonoro in prossimità della sorgente è controllato esclusivamente dal suono diretto, mentre a distanze superiori prevale il suono riflesso.

La qualità acustica di una sala è determinata dalle rispettive entità e dalle modalità di sovrapposizione dei due campi sonori.

La combinazione ottimale dei due campi varia con il tipo di segnale sonoro da trasmettere nella sala: parlato o musica di vario genere.

### 1.2.1 TEMPO DI RIVERBERAZIONE

Prima che il suono diretto emesso da una generica sorgente arrivi al ricevitore trascorre un tempo  $\tau_0$ , detto tempo di propagazione dell'onda sonora, uguale al rapporto tra la distanza della sorgente dal ricevitore e la velocità del suono.

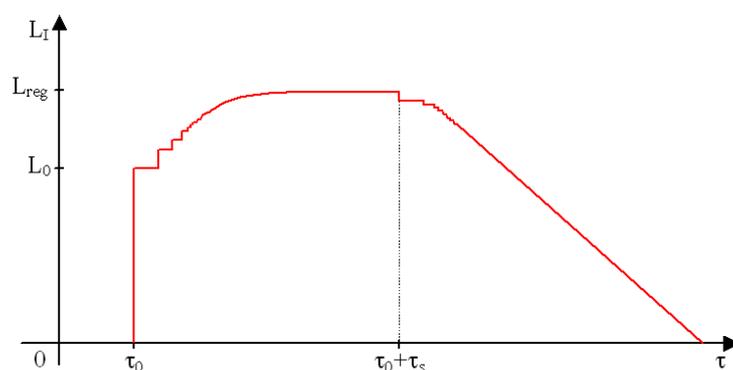
Il campo sonoro si mantiene al livello  $L_0 = L_w - 11 - 20 \lg r$ , dove  $L_0$  rappresenta il livello di intensità del suono diretto,  $L_w$  il livello di potenza e  $r$  la distanza sorgente-ricevitore, finché arriva la prima onda riflessa, poi il livello totale si trova sommando i livelli del suono diretto e del suono riflesso.

Trascorso un ulteriore ritardo, inferiore a quello precedente, arriva un altro suono riflesso e il livello totale aumenta di un altro gradino.

I suoni riflessi successivi giungono sempre più ravvicinati: il livello totale non ha un andamento a gradini, ma aumenta in modo continuo, seguendo una curva che tende al valore di regime  $L_{reg}$ . Questo valore viene raggiunto quando si stabilisce un bilancio tra l'energia emessa dalla sorgente e quella assorbita dalle pareti dato dalla densità di energia sonora.

Dal momento in cui viene spenta la sorgente il livello di pressione sonora non si annulla immediatamente a causa delle riflessioni multiple sulle pareti che proseguono il loro percorso anche dopo lo spegnimento della sorgente. Tutte queste riflessioni raggiungono un certo grado di mescolamento che non è possibile distinguerle individualmente ma formano una coda sonora compatta ed omogenea detta coda riverberante.

Si esaurisce per primo il contributo del suono diretto e si ha un piccolo gradino, perché ora il grosso dell'energia è dovuto al suono riflesso, e successivamente scompaiono i contributi dei suoni riflessi.

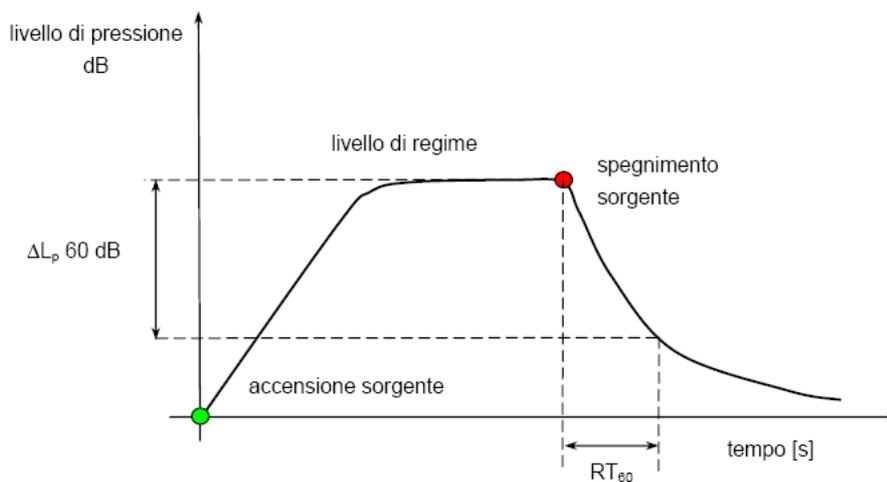


**Figura 1.12: Diagramma del livello di intensità sonora. La curva di decadimento, a differenza della curva di carico, ha un andamento rettilineo.**

L'entità di tale prolungamento, nell'ipotesi di campo uniformemente diffuso, è misurata da un descrittore fisico ossia dal tempo di riverberazione (RT).

Un campo sonoro si dice diffuso se la media temporale della densità di energia in tutti i punti è costante, la direzione di arrivo dei raggi sonori in ciascun punto deve essere ugualmente probabile e il livello di energia si mantiene costante.

Alla fine dell'800 Sabine diede la seguente definizione di tempo di riverberazione: data una sorgente stazionaria interrotta, il tempo di riverberazione è il tempo che intercorre tra l'istante in cui si esaurisce il suono diretto e l'istante in cui il livello sonoro è sceso di 60 dB.



**Figura 1.13: Andamento del tempo di riverberazione**

Il valore di questo parametro è funzione del volume della sala e dell'assorbimento totale delle sue superfici interne e, dal momento che l'assorbimento dei materiali varia con la frequenza, anche il RT va calcolato alle varie frequenze. A parità di forma della sala il RT aumenta linearmente all'aumentare delle dimensioni.

Il valore di  $T_{60}$  è calcolabile secondo la formula di Sabine:

$$T_{60} = 0.16 \frac{V}{\sum_{i=1}^N \alpha_i S_i} \quad (1.7)$$

dove  $V$  è il volume dell'ambiente in  $m^3$ ,  $A$  è l'area equivalente di assorbimento totale in  $m^2$  e 0,16 è una quantità dimensionata.

Il valore di  $A$  è ricavato con la seguente relazione:

$$A = \sum \alpha_i S_i \quad (\text{m}^2)$$

dove  $S_i$  è la superficie  $i$ -esima degli elementi presenti nell'ambiente e  $\alpha_i$  è il coefficiente di assorbimento  $i$ -esimo che è un numero che varia tra 0 e 1: 0 indica assenza di assorbimento (ossia la superficie è totalmente riflettente) mentre 1 indica assorbimento totale (assenza di riflessione). Naturalmente 0 e 1 sono valori ideali in quanto non esistono superfici che siano completamente assorbenti o completamente riflettenti.

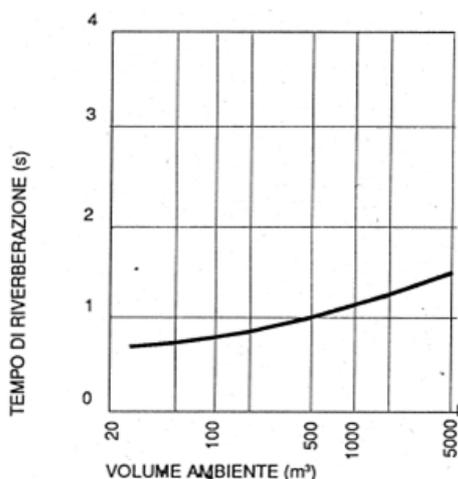
In base all'utilizzo di ogni ambiente esiste un valore ottimale del tempo di riverberazione: una prima distinzione può essere fatta valutando se l'ambiente è finalizzato all'ascolto di linguaggio parlato o di musica. L'ascolto di linguaggio parlato necessita tempi di riverberazione inferiori poiché si deve privilegiare il suono diretto rispetto a quello riverberato.

Il valore ottimale del tempo di riverbero dipende dall'uso a cui è finalizzato l'ambiente:

<b>Ambiente</b>	<b><math>T_{opt}</math> (secondi)</b>
Aula scolastica piccola	0,5
Aula scolastica grande	1
Cinema	0,7 ÷ 0,8
Teatro d'opera (musica lirica)	1,3 ÷ 1,5
Sala da concerto (musica sinfonica)	1,7 ÷ 2,3
Chiesa (musica sacra)	2,5 ÷ 5

**Tabella 1.2: Tempo di riverberazione ottimale in funzione di diverse destinazioni d'uso.**

Ad un incremento del volume dell'ambiente corrisponde un aumento del livello di riverberazione ottimale.



**Figura 1.14: Valori del tempo di riverberazione in funzione del volume dell'ambiente.**

Il fenomeno della riverberazione presenta, tuttavia, aspetti positivi e negativi. Infatti, se un certo valore del tempo di riverberazione aiuta a rinforzare il suono diretto e quindi a migliorarne l'ascolto, per contro, un valore eccessivo della coda sonora ne compromette la qualità. Per una buona ricezione, sia nel caso del parlato sia nel caso della musica, è necessario contenere la "coda sonora" (valutando il tempo di riverbero) e assicurare una buona distribuzione spaziale del campo sonoro internamente alla sala in modo tale che tutti gli ascoltatori possano percepire e apprezzare il suono indipendentemente dalla zona dell'ambiente in cui si trovano. Un tempo di riverberazione ottimale rappresenta il giusto compromesso tra il raggiungimento di un livello sonoro sufficiente in tutti i punti dell'ambiente e la riduzione del disturbo provocato da un eccesso di riverberazione.

La presenza di persone all'interno dell'ambiente influenza il valore del tempo di riverberazione, poiché determina un aumento dell'assorbimento acustico. È questo il caso dei cinema, auditori e teatri, ossia luoghi in cui l'affluenza di persone è numerosa.

Nella maggior parte dei casi le misure vengono effettuate a sala vuota ben sapendo che i risultati ottenuti non sono del tutto rappresentativi della reale risposta a sala occupata e in quanto tali andranno interpretati opportunamente. Il calcolo dell'assorbimento acustico, in

questo caso, può essere compiuto attribuendo ad ogni persona un'area di assorbimento equivalente (A), pari a:

<b>Valori di assorbimento per persona</b>					
<b>Frequenza (Hz)</b>					
125	250	500	1.000	2.000	4.000
<b>Area di assorbimento equivalente (m<sup>2</sup>)</b>					
2,5	2,5	2,9	5,0	5,2	5,0

**Tabella 1.3: Valori di assorbimento equivalente per persona alle diverse frequenze.**

Nel caso, invece, l'intera superficie sia totalmente occupata dal pubblico il coefficiente di assorbimento acustico è il seguente:

<b>Superficie totalmente occupata dal pubblico</b>					
<b>Frequenza (Hz)</b>					
125	250	500	1.000	2.000	4.000
<b>Coefficiente di assorbimento acustico</b>					
0,39	0,57	0,80	0,94	0,92	0,87

**Tabella 1.4: Valori di assorbimento in caso di superficie interamente occupata dal pubblico alle diverse frequenze.**

In teoria si dovrebbe seguire la definizione di Sabine e calcolare il tempo di riverbero sull'intervallo 0 - 60 dB, ma in situazioni reali non si verifica mai un decadimento sonoro di 60 dB. La riverberazione percepita soggettivamente è più strettamente correlata alla prima parte del decadimento piuttosto che all'intero decadimento di 60 dB. Viene distinta solo la prima parte del decadimento mentre la parte conclusiva viene mascherata. Il suono successivo, infatti, viene emesso prima ancora che il suono precedente sia completamente estinto; di conseguenza la prima parte del decadimento del secondo suono si sovrappone alla parte finale del transitorio di estinzione del primo suono. Generalmente si considera la

pendenza della parte di curva di decadimento compresa tra 0 e -10 definendo così un nuovo parametro: tempo di primo decadimento EDT o  $T_{10}$ .

Il  $T_{10}$  non è, dunque, il tempo necessario ad un decadimento di 10 dB, ma il tempo necessario ad un decadimento di 60 dB, però estrapolato da un tratto lungo il quale il livello decresce di 10 dB. Questo proprio per potere prendere in considerazione le fluttuazioni del suono che si ha nel primissimo intervallo di decadimento. Analogamente si può fare questa estrapolazione prendendo due punti aventi livello -5 e -25 e questo ci darà quello che si chiama il  $T_{20}$ , oppure si può considerare i due punti aventi livello -5 e -35 in modo da ottenere il  $T_{30}$ .

E' importante escludere i primi 5 dB di decadimento dalla misura del tempo di riverberazione per evitare l'influenza delle prime riflessioni particolarmente forti.

Tutti questi parametri ( $T_{10}$ ,  $T_{20}$ ,  $T_{30}$ ) sono sempre tempi per un decadimento di 60 dB, solo che vengono estrapolati da un intervallo lungo 10, 20 oppure 30 dB.

Il raggiungimento dei valori voluti di tempo di riverberazione può essere anche conseguito con qualche aggiustamento finale dei materiali del soffitto, delle pareti e del pavimento.

L'eccesso di riverberazione e la presenza di rumore di fondo (quantificato attraverso il rapporto segnale/rumore) influiscono negativamente sull'intelligibilità del parlato.

Per intelligibilità del parlato si intende la percentuale di parole o frasi correttamente comprese da un ascoltatore rispetto alla totalità delle frasi pronunciate da un parlatore.

L'indice STI, speech transmission index, mi permette di quantificare gli effetti che intervengono sulla riduzione dell'intelligibilità del parlato.

<b>Intelligibilità</b>	<b>Nulla</b>	<b>Cattiva</b>	<b>Scarsa</b>	<b>Accettabile</b>	<b>Buona</b>	<b>Eccellente</b>
<b>STI</b>	0	<0.30	0.30- 0.45	0.45-0.60	0.60- 0.75	>0.75

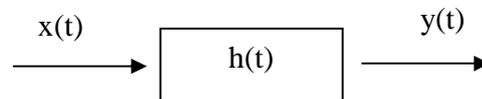
**Tabella 1.5: Valori assunti dall' indice di intelligibilità del parlato.**

Aumentando l'energia delle prime riflessioni, quella contenuta nella prima parte del decadimento dell'impulso, si aumenta e si migliora l'intelligibilità, mentre aumentando

l'energia delle riflessioni successive (riverberazione) accade il contrario. Maggiore è il rapporto tra le prime riflessioni e le successive, migliore è la condizione di intelligibilità. Pertanto occorre favorire le riflessioni immediate per avere migliori condizioni di ascolto.

### 1.2.2 RISPOSTA ALL'IMPULSO

L'analisi dell'acustica di una sala e la misurazione dei parametri acustici che la caratterizzano si compie sollecitando un sistema (nel nostro caso un ambiente chiuso) e ricavandone così la risposta all'impulso.

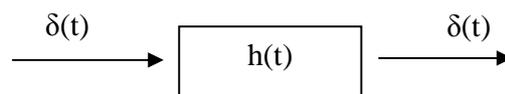


Da un punto di vista matematico un sistema è una trasformazione che ad un segnale d'ingresso  $x(t)$  fa corrispondere un determinato ed unico segnale d'uscita  $y(t)$ .

Dalla risposta all'impulso si possono estrarre un grande quantitativo di informazioni sull'acustica dell'ambiente, come i tempi di riverberazione (la legge di decadimento riverberante è calcolabile attraverso l'integrale di Schroder della risposta all'impulso) e molti altri parametri acustici caratteristici della sala.

La risposta impulsiva non è altro che l'uscita del sistema sollecitato da un segnale impulsivo  $x(t)=\delta(t)$ , dove con  $\delta(t)$  indichiamo la funzione generalizzata impulso unitario, nota anche come delta di Dirac. Dal punto di vista percettivo umano, un segnale può essere considerato un segnale impulsivo se la sua durata temporale è una frazione di millisecondo. Questo particolare impulso è riproducibile in modo approssimativo con un colpo di pistola o con lo scoppio di un palloncino d'aria.

Convenzionalmente la risposta impulsiva viene indicata con  $h(t)$ . Abbiamo quindi che:



Dato l'impulso d'ingresso  $\delta(t)$ , registrando il segnale in uscita si può ricavare la risposta dell'ambiente  $h(t)$ .

Si presuppone quindi che il campo acustico in un ambiente sia lineare.

La risposta all'impulso in ambiente di un generico segnale  $x(t)$  è calcolabile come:

$$y(t) = x(t) \otimes h(t) = \int_0^{\infty} h(t) x(t - \tau) d\tau \quad (1.8)$$

La risposta in frequenza  $H(f)$ , o funzione di trasferimento, è la trasformata di Fourier (FT) della risposta all'impulso  $h(t)$ .

Viene definita come differenza di ampiezza e fase tra il segnale in ingresso e quello in uscita (ma stessa frequenza).

Dati quindi:

$$X(f) = \text{FT}(x(t))$$

$$Y(f) = \text{FT}(y(t))$$

$$H(f) = \text{FT}(h(t))$$

Per le proprietà della convoluzione si ha:

$$y = x \otimes h \xrightarrow{\text{FFT}} Y = X \cdot H \quad (1.9)$$

Lo spettro di  $y(t)$  è quindi il prodotto degli spettri di  $h(t)$  e di  $x(t)$ .

Quindi il legame ingresso-uscita è:

$$\text{tempo} \quad x(t) \gg h(t) \gg y(t) = x(t) * h(t)$$

$$\text{frequenza} \quad X(f) \gg H(f) \gg Y(f) = X(f) \cdot H(f)$$

Per le applicazioni numeriche è infine utile ricordare che la convoluzione nel tempo può essere espressa in questo modo:

$$y(t) = \text{IFT} [ \text{FT}(x) \cdot \text{FT}(y) ] \quad (1.10)$$

Dove IFT è la trasformata di Fourier inversa.

La risposta impulsiva di una stanza, in seguito all'emissione di un segnale impulsivo, è composta da numerosi singoli impulsi il primo dei quali rappresenta il suono diretto mentre gli altri vengono ad essere le riflessioni successive. L'ascoltatore sente per primo il segnale dovuto all'onda diretta che attraversa lo spazio in linea retta dalla sorgente fino alle orecchie.

Successivamente seguono una serie di prime riflessioni (*early reflections*) provenienti dalle pareti poste in vicinanza della sorgente e dell'ascoltatore. I suoni riflessi percorrono un cammino maggiore rispetto alle onde dirette (vedi fig.1.18) e inoltre a causa dell'assorbimento delle superfici perdono di intensità risultando meno intense del suono diretto.

Questi fenomeni possono essere rappresentati come in figura 1.18 ponendo in ascisse il tempo (solitamente in ms) e in ordinate il livello sonoro delle onde acustiche, a partire dall'onda diretta che di solito viene posizionata nell'origine degli assi in modo da facilitare la lettura dei tempi relativi delle riflessioni successive.

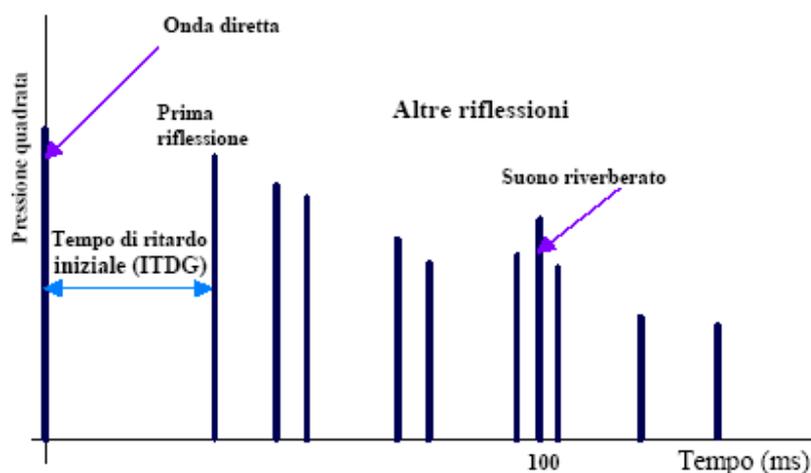


Figura 1.15: Risposta all'impulso ideale (ecogramma).

Il sistema uditivo ha un tempo di integrazione di circa 50 ms per il parlato e 80 ms per la musica: le prime riflessioni, intense e isolate, comprese in questo intervallo, vengono

sommate al campo diretto aumentandone il livello sonoro e a rendere il trasferimento dell'informazione più chiaro e più preciso mentre la coda riverberante, pur essendo energia sonora che contribuisce in maniera rilevante al livello complessivo, risulta disturbante.

Data la somma progressiva delle riflessioni, all'interno di un ambiente medio di ascolto, il suono oltre i 100 ms dal suono diretto decade solitamente in modo esponenziale ed è su questa caduta di livello che viene calcolato il tempo di riverberazione.

L'intervallo di tempo che separa la percezione dell'onda diretta da quella della prima riflessione si dice tempo di ritardo iniziale (ITGD).

### **1.3 PARAMETRI ACUSTICI**

Il tempo di riverberazione è stato considerato fino agli anni cinquanta il principale, se non l'unico, descrittore fisico usato come parametro oggettivo di valutazione del comportamento acustico di una sala.

La norma ISO 3382-1 (2005), revisione della precedente ISO 3382(1997), costituisce a livello internazionale l'unico riferimento normativo per la definizione di terminologia, condizioni e descrittori per la misurazione della risposta all'impulso delle sale.

I descrittori acustici derivano dalla risposta impulsiva di un qualsiasi punto di un ambiente. Ciascuno di essi si basa su frazioni di energia che si possono calcolare dalla risposta quadratica della pressione mediante semplice integrazione.

I parametri stessi sono poi facili da calcolare in quanto si basano sul rapporto tra prime riflessioni e successive riflessioni : è un rapporto in cui al numeratore vi è la somma delle energie del suono diretto e delle prime riflessioni, mentre al denominatore vi è la somma di tutte le riflessioni successive. Infatti queste frazioni energetiche sono fondate sull'ipotesi che la percezione soggettiva di un suono sia dovuta alla parte iniziale di energia considerata utile (early arriving Energy) per la chiarezza e la nitidezza del segnale ricevuto e che la rimanente parte (later arriving Energy) sia dannosa e contribuisca negativamente.

Esiste un valore ottimale del rapporto tra energia utile e non che varia per il parlato e per la musica.

Il primo parametro acustico, la *Definizione*, è così definito:

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50ms} p^2(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} p^2(\tau) d\tau} \quad (1.11)$$

Il simbolo D esteso con il pedice 50 sta a ricordare che il suono che viene assunto come utile al trasferimento dell'informazione è quello presente nei primi 50 ms. Viene imposto un intervallo di tempo ristretto per considerare solamente l'effetto delle riflessioni laterali immediate (early reflections).

Questo parametro, per come è definito, è una grandezza adimensionale, un numero, che può variare da 0 a 1; nel caso di presenza di solo suono diretto vale 1, nel caso, ideale, di completa assenza di suono diretto ed esclusiva presenza di campo riverberante il valore limite del rapporto tende a 0.

Questo è un indice che venne definito primariamente con lo scopo di caratterizzare le sale destinate alla parola (come ad esempio le aule scolastiche) i cui valori ottimali sono all'incirca 0,7 / 0,8 (70 – 80 %).

Un'altra grandezza che viene definita nella norma ISO3382 è l'*indice di chiarezza*.

La sua definizione è:

$$C_{50} = 10 \cdot \log \frac{\int_0^{50ms} p^2(\tau) d\tau}{\int_{50ms}^{\infty} p^2(\tau) d\tau}, \text{ dB} \quad (1.12)$$

Rappresenta il rapporto tra l'energia dei primi 50 ms e l'energia che giunge all'ascoltatore da 50 ms alla fine del decadimento del segnale.

Valori di chiarezza positivi (1, 2 dB) indicano un campo sonoro molto chiaro, troppo chiaro dopo i 2 dB; viceversa valori negativi (-1, -2 dB) indicano un campo sonoro poco chiaro, e valori inferiori ai -2 dB non sono considerati accettabili.

Quindi l'intervallo ottimale, per questo parametro, è dai -2 ai +2 dB.

Quando si analizza una sala che ha anche una funzione musicale (si possono infatti avere sale che hanno la doppia funzione: tipicamente un auditorium) il parametro  $C_{50}$  non è più il parametro corretto in quanto è un parametro corretto solo per il parlato. Per la musica, siccome vogliamo un suono più legato, più mescolato, si possono accettare riflessioni più tardive.

Una riflessione, infatti, che arriva 70 ms dopo il suono diretto è già dannosa per il parlato, ma è ancora utile per la musica. Di conseguenza, per l'utilizzo musicale, si definisce un ulteriore indice di chiarezza, chiamato  $C_{80}$ :

$$C_{80} = 10 \cdot \log \frac{\int_0^{80ms} p^2(\tau) d\tau}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(\tau) d\tau}, \text{ dB} \quad (1.13)$$

Nel rapporto vi è a numeratore l'energia "precoce" (si considera tale, in questo caso, il suono da 0 a 80 ms) e a denominatore l'energia "tardiva" che perviene negli istanti successivi (il suono da 80 ms all'infinito).

Il  $C_{80}$  ha lo stesso intervallo ottimale del  $C_{50}$ : (-2 dB, +2 dB).

Tanto maggiore è il valore di questi ultimi 2 parametri tanto maggiore è il contributo delle riflessioni utili al rafforzamento del segnale; i loro valori sono espressi in Decibel.

La ISO 3382 introduce un ulteriore parametro acustico : *istante baricentrico dell'energia o tempo centrale*  $t_5$ .

Viene calcolato con la seguente espressione:

$$t_s = \frac{\int_0^{\infty} \tau \cdot p^2(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} p^2(\tau) d\tau} \quad , \text{ ms} \quad (1.14)$$

L'istante baricentrico è in pratica il centro di gravità della risposta impulsiva quadratica.

E' ottenuto pesando i tempi di ritardo dell'energia in arrivo in ogni istante in funzione dell'entità di quest'energia rispetto all'energia totale che arriva: maggiori sono le prime riflessioni , maggiore è il tempo baricentrico.

Con il tempo centrale si supera il problema di separare le prime riflessioni dalla successive:  $T_s$  viene a rappresentare il punto dove si equilibra l'energia utile e l'energia dannosa.

I valori ottimali di questo parametro per quanto riguarda il parlato oscillano da 0 a 50 ms, in campo musicale, invece il valore suggerito è 50 - 250 ms.

Anche la distribuzione di energia all'interno della sala costituisce un parametro assai considerevole nello studio della qualità acustica. A tale scopo è stato introdotto un parametro definito *indice di intensità (Sound Strength)*,  $G$ . Esso viene definita dalla ISO3382 come <il rapporto logaritmico della pressione sonora al quadrato della risposta all'impulso esaminata con la pressione sonora al quadrato della risposta all'impulso misurata con la medesima sorgente sonora collocata in campo libero a 10 metri di distanza>[8].

Definita  $p_{10}$  la pressione sonora della sorgente a 10 metri di distanza, si può scrivere :

$$G = 10 \cdot \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} \quad , \text{ dB} \quad (1.15)$$

In genere:

$$G = 0 \div 15 \text{ dB}$$

$G \approx 0 \text{ dB}$  per locali grandi, poco assorbenti

$G \approx 15 \text{ dB}$  per locali piccoli, molto assorbenti

Sebbene non sia indicato nella ISO3382, dalla *strength* è possibile calcolare il *balance*, ossia la variazione di energia acustica percepita nella sala al variare della posizione delle sorgenti.

Il sistema uditivo umano non riesce ad identificare la direzione di provenienza di ogni riflessione della moltitudine che lo sollecita ma elabora questa particolare sensazione a cui fa riferimento con il termine di impressione spaziale. Si tratta dell'impressione acustica di essere in uno spazio tridimensionale chiuso, di sentirsi avvolti dal suono e di percepire la fonte sonora più estesa di quanto lo sia in realtà. Per elaborare questa sensazione di spazialità l'udito richiede la presenza di forti riflessioni laterali nell'intervallo di tempo utile all'ascolto.

A proposito sono stati definiti 2 ulteriori parametri connessi a tale sensazione soggettiva, quali l'Auditory Source Width (ASW) e la Listener Envelopment (LEV) .

Per formalizzare la ASW, la ISO 3382 usa la frazione dell' energia laterale .

I due descrittori spaziali derivano dall'integrazione della risposta all'impulso ottenuta con microfono omnidirezionale  $p(t)$  e quella ottenuta con microfono doppio cardiode  $p_l(t)$  orientato con l'asse dei lobi ortogonale alla direzione della sorgente.

L' Early Lateral Energy Fraction (LF) e l'Early Lateral Energy Fraction Coefficient (LFC) sono definiti come:

$$LF = \frac{\int_0^{80\text{ ms}} p_l^2(t) dt}{\int_0^{80\text{ ms}} p^2(t) dt} \quad (1.16)$$

$$LFC = \frac{\int_0^{80\text{ ms}} |p_l(t) p(t)| dt}{\int_0^{80\text{ ms}} p^2(t) dt} \quad (1.17)$$

Per formalizzare la LEV si definisce la Lateral Gain:

$$LG = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p_l^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} \quad (1.18)$$

Dove  $p_l(t)$  è la pressione sonora intesa sempre come risposta all'impulso misurata tramite un microfono con diagramma a 8 mentre  $p_{10}(t)$  tramite un microfono omnidirezionale ad una distanza di 10 metri.

Una caratteristica importante per l'acustica di un locale (in particolare se adibito all'ascolto di musica) è l'impressione spaziale, cioè la possibilità di determinare, durante l'ascolto, la direzione di provenienza dei suoni captati.

Questo concetto è legato all'audizione binaurale espletata dall'orecchio umano: l'orecchio destro e quello sinistro captano i suoni in modo differente permettendo di stabilire la posizione della sorgente sonora.

La quantificazione dell'impressione spaziale è effettuata tramite la Funzione di Correlazione mutua interaurale (IACC) che tende a quantificare la sensazione dovuta alla differenza fra le pressioni sonore che giungono alle due orecchie creando una correlazione tra le due diverse percezioni che risulta connessa all'impressione spaziale. Viene così definita:

$$IACC = \frac{\int_0^{\infty} p_d(t) p_s(t + \tau) dt}{\left[ \int_0^{\infty} p_d^2(t) dt + \int_0^{\infty} p_s^2(t) dt \right]^{1/2}} \quad (1.19)$$

Per eseguire misurazioni in modalità stereofonica è necessario l'utilizzo di un microfono binaurale. Esso è costituito sostanzialmente da due ricevitori situati simmetricamente (a sinistra e a destra) rispetto ad un apposito sostegno (ad esempio simile a cuffie, da indossare, oppure il tutto costituito eventualmente dal modellino di un ascoltatore).

#### 1.4 SIMULAZIONE DEL CAMPO ACUSTICO

Spesso, al fine di studiare l'acustica di un ambiente in relazione alle possibili soluzioni progettuali, sia esse architettoniche, sia esse elettroacustiche, vengono utilizzati appositi programmi finalizzati alla previsione del campo sonoro nell'ambiente che si prende in considerazione.

Grazie a tali programmi è possibile studiare e ottimizzare l'acustica di un teatro, di una sala da concerto o di un ambiente destinato ad ospitare una o più sorgenti sonore.

Si sono sviluppate diverse tecniche di propagazione del suono orientate specificatamente alle singole esigenze di applicazione.

Si può procedere in due modi:

1. approssimazione sul dominio spaziale;

## 2. approssimazione del campo acustico.

Il primo metodo viene usato ogni qualvolta le dimensioni dell'ambiente da studiare sono confrontabili con quelle della lunghezza d'onda del suono per cui è necessario considerare la natura ondulatoria del fenomeno (acustica ondulatoria).

Il metodo degli elementi finiti (finite element method, FEM ) è un metodo di discretizzazione del dominio spaziale che permette di integrare l'equazione di D' Alembert anche su domini di forma irregolare e con condizioni al contorno irregolari permettendo così di risolvere anche sistemi complessi.

Il passo di discretizzazione deve essere sufficientemente piccolo rispetto alla lunghezza d'onda del suono ( minore di un 1/8 della lunghezza d'onda) e quindi bisogna considerare un gran numero di elementi, ovvero di incognite. Proprio per questo motivo il metodo degli elementi finiti viene utilizzato principalmente per la previsione del campo sonoro in piccoli ambienti.

Tale metodo non presenta particolari difficoltà ma necessita di elevati tempi di calcolo.

Per i grandi ambienti invece, sale da conferenza o teatri, molti fenomeni complessi legati alla natura ondulatoria del suono, come l'interferenza e la diffrazione, non agiscono in maniera significativa ed è possibile studiare il campo acustico secondo semplici leggi geometriche.

Il comportamento delle onde sonore può essere studiato con la teoria geometrica dell'acustica, di cui noi prendiamo in considerazione solo due metodologie di calcolo (algoritmi):

- 1        Tecnica delle sorgenti immagine;
- 2        Tecnica del ray tracing .

Queste 2 tipologie di programmi hanno l'obiettivo di prevedere in che modo l'energia acustica emessa da una sorgente sonora si propaga mediante raggi rettilinei, subendo fenomeni di riflessione sulle superfici (con modalità speculari e/o diffusa) ed eventualmente diffrazione sui bordi degli ostacoli.

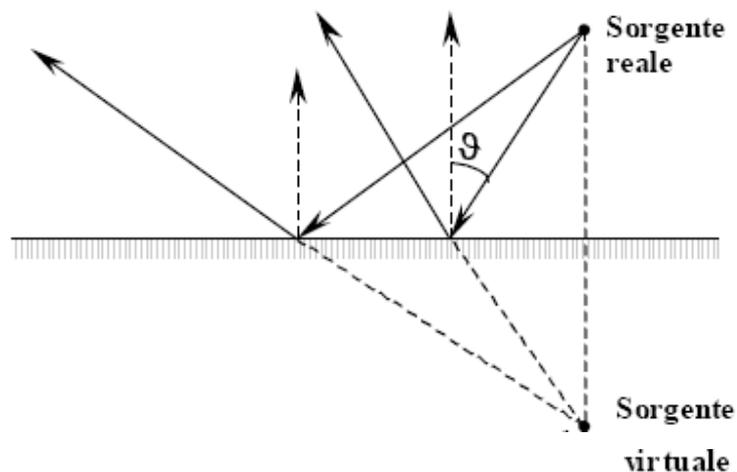
Nonostante le semplificazioni introdotte, le metodiche di calcolo basate sull'acustica geometrica sono in grado di fornire previsioni attendibili della propagazione sonora in un ambiente.

La quantità di informazioni che si può ricavare servirà in seguito per ottenere la risposta all'impulso da cui discendono i diversi descrittori acustici.

Tanto più raffinato è il metodo di calcolo impiegato, tanto maggiore è il numero e l'accuratezza richiesta dai dati in ingresso necessari.

#### 1.4.1 SORGENTI VIRTUALI

Se un'onda sonora, rappresentabile come raggio sonoro, colpisce una parete piana viene riflesso dalla parete stessa.



**Figura 1.16: Costruzione di una sorgente virtuale.**

Ogni raggio emesso da una sorgente reale e riflesso dalla parete si può pensare come se fosse stato generato da una sorgente fittizia, sorgente immagine, situata dietro alla superficie riflettente alla stessa distanza della sorgente reale.

L'effetto della parete viene rappresentato completamente dalla sorgente immagine nell'ipotesi che essa emetta lo stesso segnale della sorgente e che le sue caratteristiche siano simmetriche a quelle delle sorgente reale.

In particolare, come rappresentato in figura, sempre mediante la schematizzazione dei raggi sonori, il raggio riflesso forma lo stesso angolo  $\theta$  con la normale alla superficie del raggio incidente (angolo di incidenza ed angolo di riflessione sono uguali) e i due raggi giacciono sullo stesso piano.

Si parla, quindi, di riflessione speculare o regolare. In questi casi, in cui  $\lambda$  è molto minore delle dimensioni lineari dell'ostacolo, si possono studiare i fenomeni di propagazione mediante le ipotesi dell'acustica geometrica.

L'energia riflessa è solo una parte di quella incidente.

Ciascun raggio durante il suo percorso subisce una serie di riflessioni multiple e l'energia da essi trasportata mano a mano diminuisce a causa della divergenza geometrica dovuta all'allontanamento progressivo dalla sorgente ed ad altri fenomeni dissipativi quali l'assorbimento delle superfici di confine attraversate dal raggio e l'attenuazione dell'aria.

L'assorbimento da parte della pareti viene rappresentato dal coefficiente  $\alpha$  e dipende in generale dall'angolo di incidenza e dalla frequenza. Ad ogni riflessione il segnale si riduce di un fattore  $(1-\alpha)$  dell'intensità iniziale.

Se ci sono  $n$  riflessioni al secondo, dopo un tempo  $t$ , l'intensità si è ridotta di un fattore:

$$(1 - \alpha)^{nt} = e^{[nt \ln(1-\alpha)]} \quad (1.20)$$

Inoltre, parte dell'intensità viene ulteriormente persa per l'assorbimento del mezzo, rappresentabile tramite una costante di smorzamento  $m$ , dovuta al fatto che l'aria non è un mezzo perfettamente elastico e quindi si ha, durante la propagazione sonora, una certa dissipazione. L'intensità decresce con una legge del tipo  $\exp(-mct)$  dove  $ct = r$ .

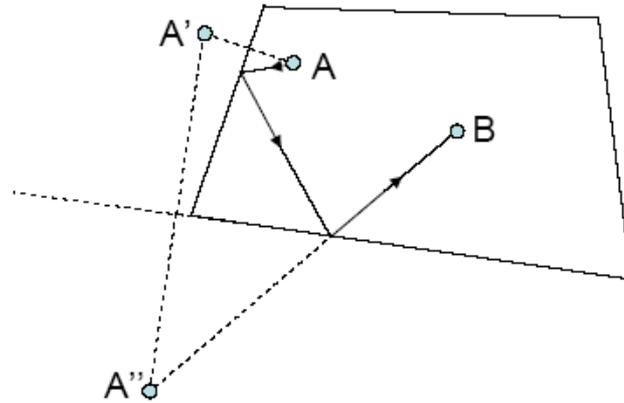
In totale l'intensità delle riflessioni nel punto di osservazione all'istante  $t$  ( $t > 0$ ) è:

$$I = \frac{A}{(ct)^2} e^{[-mct + n \ln(1-\alpha)]t} \quad (1.21)$$

in cui  $A$  è una costante.

Il percorso di ogni raggio termina quando incontra una superficie perfettamente assorbente o finchè la sua energia non si esaurisce.

Il suo viaggio completo può essere rappresentato mediante sorgenti immagine di ordine superiore al primo.



**Figura 1.17: Sorgenti immagine del primo e secondo ordine.**

La prima sorgente immagine  $A'$  è stata trovata in maniera analoga a quella di prima mentre la seconda sorgente immagine  $A''$  viene costruita dalla prima ed è relativa alla parete successiva che il raggio colpirà.

I raggi continuano a riflettersi sulle altre pareti creando raggi riflessi di ordine superiore che si ottengono geometricamente continuando a specularizzare le sorgenti rispetto al loro piano fino a creare una vera e propria rappresentazione geometrica dei percorsi dei vari raggi sonori.

I raggi sonori che hanno rimbalzato su tutte le pareti accumulando ritardi e perdite di energia via via crescenti. I livelli sonori continuano a decrescere finché ad un certo punto si ha una sorta di coda sonora continua dove non è più possibile separare un'onda riflessa da un'altra in quanto ne arrivano una moltitudine negli stessi istanti di tempo provenienti da direzioni diverse.

In una geometria particolarmente semplice il metodo è molto efficace ed è possibile generare iterativamente sorgenti di ordine molto elevato arrivando a descrivere correttamente buona parte della coda riverberante costituita dall'arrivo di tutte le onde riflesse.

Quando viceversa la geometria è più complicata, dopo aver generato un numero elevato di sorgenti virtuali, è necessario verificare quelle effettivamente viste dal ricevitore.

Definita una particolare posizione della sorgente e del ricevitore non è detto che tutte le sorgenti virtuali siano in grado di inviare energia che “attraversi” tutte le superfici che hanno generato la sorgente virtuale. Infatti può succedere che il raggio sonoro colpisca il piano di una superficie al di fuori del contorno della stessa.

Può succedere che, pur venendo generate centinaia di migliaia di sorgenti immagine, solo una piccolissima percentuale delle stesse supera il test di visibilità mentre tutte le altre non contribuiscono al campo sonoro nel ricevitore considerato.

Poiché il calcolo comprende numerosi e complicati controlli che devono essere ripetuti per ogni ricevitore, l’elaborazione diviene molto lenta.

In genere non si riesce mai ad arrivare a previsioni superiori a 5 ordini di riflessioni che da una parte sono adeguati per valutare l’andamento del livello sonoro ma dall’altra non sono sufficienti per ricostruire l’andamento della coda sonora (per calcolare ad esempio il tempo di riverberazione). La parte mancante di essa viene ricostruita, ad esempio ricorrendo alla teoria statistica del campo diffuso.

Se  $N$  è il numero delle pareti, si hanno  $N$  sorgenti immagine del primo ordine alle quali corrispondono  $(N-1)$  sorgenti immagini del secondo ordine ed in totale verranno ad essere  $N(N-1)$ .

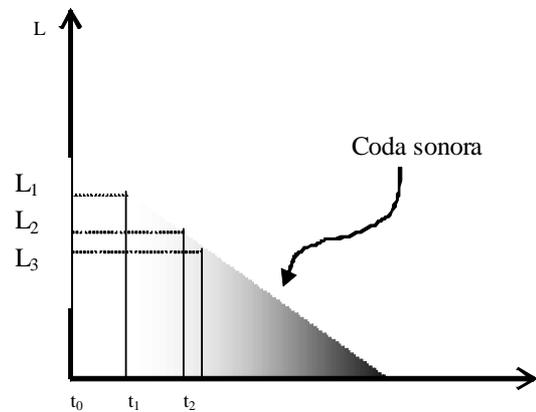
In generale il numero di sorgenti immagine di ordine  $i$  ( $i \geq 1$ ) è  $N(n-1)^{i-1}$

In totale il numero di sorgenti immagine fino all’ordine  $i_0$  è:

$$N(i_0) = \frac{N(n-1)^{i_0} - 1}{N-2} \quad (1.22)$$

Il numero di sorgenti immagine esplode in maniera geometrica con l’ordine della riflessione.

I dati relativi ai singoli arrivi di energia vengono rappresentati graficamente in un diagramma dove viene rappresentato il livello sonoro in funzione del tempo.



**Figura 1.18: Andamento del livello in funzione del tempo**

Ci aspettiamo che accadano due fenomeni contemporaneamente: i tempi ai quali arriva un nuovo raggio diventano via via sempre più fitti ed si uniformano a causa della crescita veloce del numero di raggi riflessi, ma la loro intensità si riduce fino a decadere a zero a causa dell'assorbimento. Si ha allora il fenomeno noto come coda sonora o riverberazione.

Quindi una volta individuata la posizione di una sorgente immagine, si calcola il contributo al campo sonoro nel punto ricevente considerando la sorgente stessa come se fosse in campo libero alla distanza effettiva tra sorgente immagine e ricevitore con potenza sonora ridotta per effetto dell'assorbimento, ed impiegando la seguente relazione :

$$L_{TOT} = L_W + 10 \log \left[ \frac{Q_{DIR}}{4\pi(r_{dir})^2} + \sum_{j=1}^n \left( \frac{Q_j}{4\pi r_j^2} \cdot \prod_{i=1}^m (1 - \alpha_i) \right) \right] \quad (1.23)$$

Ossia il livello sonoro complessivo di ogni singolo arrivo è pari alla somma energetica dei livelli sonori di tutte le riflessioni e dell'onda diretta.

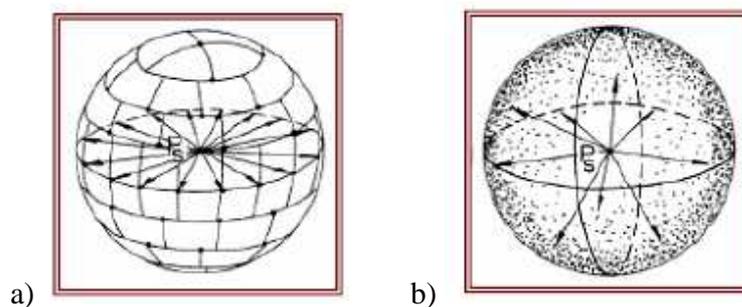
Poiché in base alla distanza percorsa è noto il tempo impiegato dall'onda a raggiungere il ricevitore, è possibile ricostruire a partire dai singoli arrivi d' energia sonora la risposta all' impulso in ciascun ricevitore e tramite integrazione all'indietro valutare sia il livello sonoro a regime sia il tempo di riverberazione.

### 1.4.2 RAY TRACING

A partire dalla sorgente sonora (puntiforme) si lancia un gran numero di "raggi sonori" in direzioni scelte a caso, con una certa energia iniziale dipendente dalla direttività della sorgente nella particolare direzione considerata. I raggi si propagano alla velocità del suono, restando rettilinei, e rimbalzano via via entro l'ambiente per effetto delle riflessioni multiple. Ad ogni rimbalzo, l'energia posseduta dal raggio viene ridotta di una quota a causa dell'assorbimento delle pareti, che può essere resa variabile in funzione dell'angolo di incidenza, e dell'attenuazione dovuta alla dissipazione nel mezzo (aria), mentre non deve essere presa in considerazione la divergenza sferica: a ciò provvede già la divergenza fra i raggi e la conseguente riduzione del numero di essi che va ad impattare su un ricevitore al crescere della distanza dello stesso dalla sorgente.

La generazione dei raggi può avvenire secondo due diverse modalità:

1. deterministica: le direzioni di emissione sono determinate dai vettori posizione di una sfera unitaria centrata nella sorgente secondo una regola geometrica di partizione.
2. statistica: i vettori direzionali sono determinati in base ad una regola statistica in modo da assicurare la copertura uniforme della sfera.



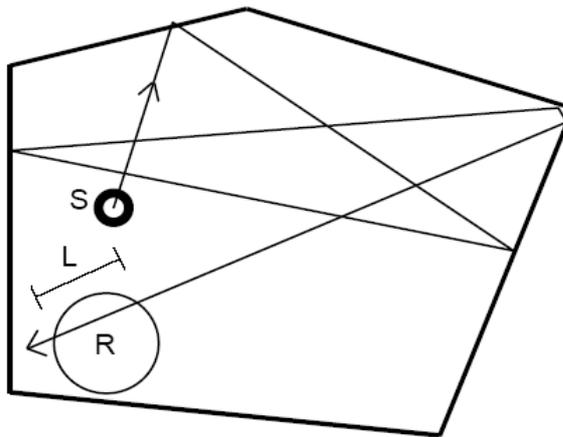
**Figura 1.19: Metodi di generazione dei raggi sonori: a) deterministico; b) statistico. La sorgente è posizionata in  $P_s$ .**

I due metodi sono equivalenti per quanto riguarda l'uniformità della distribuzione dei raggi.

Il metodo deterministico la realizza solo quando i raggi sono stati generati nella loro totalità. Inoltre la distribuzione dei raggi dipende dal loro numero. Quindi la simulazione compiuta per un dato numero di raggi è inutilizzabile quando se ne varia il numero.

Al contrario con la generazione statistica l'uniformità della distribuzione dei raggi è garantita qualunque sia il numero, purchè sia sufficientemente elevato.

I raggi vengono poi seguiti nelle loro riflessioni sulle superfici di contorno, che possono avvenire sia con legge speculare che diffusa; in quest'ultimo caso, viene impiegato un generatore di numeri casuali per reindirizzare il raggio in una direzione arbitraria. I ricevitori non possono essere puntiformi perché in tal caso la probabilità di captazione sarebbe nulla. Si usano quindi volumi finiti, di forma sferica, posizionati in corrispondenza dei ricevitori.



**Figura 1.20: Generazione di raggi, di tracciamento degli stessi e di impatto su un ricevitore sferico a densità.**

La potenza associata a ciascun raggio corrisponde alla potenza emessa dalla sorgente e alla direttività divisa per il numero totale di raggi. La potenza sonora che raggiunge l' $m$ -esimo ricevitore nel generico intervallo di tempo  $\Delta T$  è la somma delle potenze trasportate da ciascun

raggio:

$$W_m = \frac{WQ}{J_0} \sum_{j=1}^{J_m} \left( \frac{d_{jm}}{D_m} e^{-m\alpha_j r_j} \prod_{l_j=0}^{L_j} (1 - \alpha_{l_j}) \right) \quad (1.24)$$

$J_0$ : numero totale di raggi

$J_m$ : numero di raggi captati dall' $m$ -esimo ricevitore

$D_{jm}$ : lunghezza della corda intersezione tra il  $j$ -esimo raggio e l' $m$ -esima sfera ricevente

$D_m$ : diametro dell' $m$ -esimo ricevitore

$r_j$ : distanza percorsa dal raggio

$L_j$ : ordine massimo di riflessione

$\alpha_{l_j}$ : coefficiente di assorbimento della  $l$ -esima parete.

Affinchè il metodo fornisca risultati statisticamente stabili, è necessario generare un numero elevato di raggi e usare ricevitori sufficientemente grandi.

Il generico raggio ha termine quando è verificata una delle seguenti condizioni:

1. la potenza trasportata ha raggiunto un valore minimo prefissato;
2. l'ordine di riflessione ha raggiunto un valore massimo prefissato;
3. la lunghezza del raggio ha raggiunto un valore massimo prefissato;
4. il tempo di percorrenza ha raggiunto un valore massimo prefissato.

Lehnert [11] calcolò la dimensione  $r$  del ricevitore per un certo numero di raggi  $N$  e la lunghezza massima di un raggio ( che è il percorso più lungo che il raggio può fare ) attraverso la seguente formula:

$$r = L_{max} \left( \frac{2\pi}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.25)$$

In alternativa è possibile usare la seguente espressione, dove  $V_R$  e  $R$  sono rispettivamente il volume del ricevitore e dell'ambiente:

$$V_R = \frac{10 V}{N} \quad (1.26)$$

Da cui:

$$r = \left( \frac{15V}{2\pi N} \right)^{1/3} \quad (1.27)$$

Ogni volta che un raggio interseca una sfera ricevitore, le cede una certa dose di energia che è proporzionale alla lunghezza del segmento di raggio intersecato.

Dato che quando si parla di ambienti chiusi si assume sempre l'ipotesi di campo sonoro diffuso si calcola la densità dell'energia sonora, quindi l'energia per unità di volume che si viene a stabilire nella sfera ricevente.

I dati ricevuti vengono memorizzati dal "contatore" e poi restituiti sotto forma di istogramma nel quale viene riportato per ogni di tempo l'energia di tutti i raggi che attraversano il contatore stesso.

#### 1.4.2.1 DIFFUSIONE IN RAY TRACING

In prima approssimazione il modello del Ray\_Tracing assume quattro diverse combinazioni di riflessioni. Esse sono : S-S, S-D, D-S, D-D. S-speculare, D-diffusa.

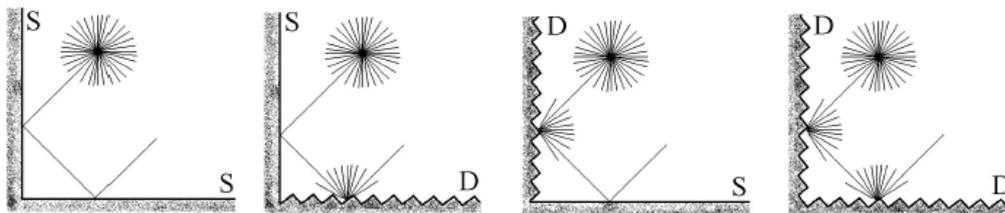


Figura 1.21: Quattro possibili combinazioni di riflessione nel ray tracing. S, speculare; D, diffusa.

Per quantificare i due contributi, uno relativo alla riflessione speculare e l'altro a quella diffusa, è stato introdotto il coefficiente di diffusione  $\delta$ .

Il coefficiente di diffusione  $\delta$  di una superficie è il rapporto fra la potenza sonora riflessa in direzione non speculare e la potenza sonora totale riflessa.

$$\delta = \frac{W_{ref.Non-specular}}{W_{ref.Non-specular} + W_{ref.specular}} \quad (1.28)$$

Questa definizione è applicabile per un angolo di incidenza dato, supponendo che la potenza sia riflessa in parte in modo speculare ed in parte in modo diffuso.

In relazione alla figura 2.24, siano  $P_{inc}$  la potenza sonora incidente,  $P_{rifl}$  quella riflessa totale,  $P_{diff}$  la componente diffusa e  $P_{spec}$  quella speculare; in base alla definizione precedente:

$$P_{diff} = \delta P_{rifl} = \delta (1 - \alpha) P_{inc} \quad (1.29)$$

In modo analogo è possibile esprimere la potenza sonora riflessa specularmente:

$$P_{spec} = (1 - \delta) P_{rifl} = (1 - \delta)(1 - \alpha) P_{inc} \quad (1.30)$$

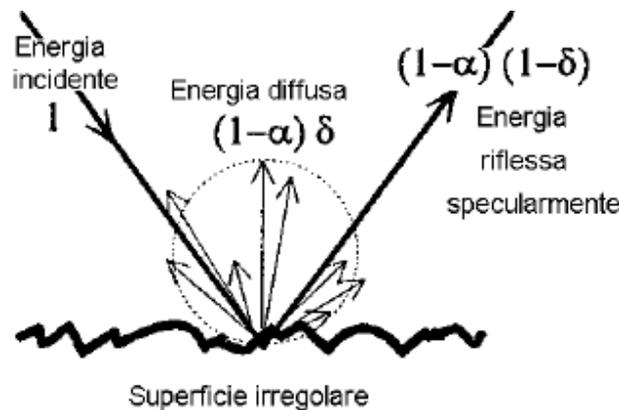


Figura 1.22: Una superficie irregolare colpita da un'onda sonora riflette specularmente parte dell'energia incidente che non viene assorbita, diffondendo la frazione di energia rimanente.

Il coefficiente di diffusione può assumere valori compresi fra 0 e 1, dove  $\delta=0$  significa che la riflessione è puramente speculare e  $\delta=1$  significa che tutta la potenza è riflessa in modo diffuso e quella riflessa specularmente è nulla.

Quando un raggio colpisce una superficie viene generato un numero di raggi casuale nel range [ 0, 1 ].

Se il numero è più piccolo di  $\delta$  si ha riflessione diffusa, altrimenti riflessione speculare.

#### 1.4.2.2 ALGORITMO DI CALCOLO

Il ray tracing è un metodo diretto e statistico. In particolare, il metodo converge statisticamente all'aumentare del numero di raggi. Si ha infatti che l'errore relativo  $\varepsilon$  della densità di energia per una sfera ricevente che ha captato  $j_m$  raggi è all'incirca:

$$\varepsilon \approx \frac{1}{\sqrt{j_m}} \quad (1.31)$$

L'algoritmo richiede che siano effettuati i seguenti controlli:

1. i raggi devono colpire la parte interna delle pareti;
2. i raggi devono viaggiare davanti alle pareti;
3. i punti di riflessione devono appartenere alle pareti;
4. ogni raggio deve seguire il minimo percorso.

Il costo computazionale del ray tracing aumenta linearmente con il numero di raggi e la loro durata. Ciò significa che si ha un rapporto costante tra lunghezza degli ecogrammi e tempo di calcolo.

La parte più onerosa del metodo è la rappresentazione delle caratteristiche geometriche e fisiche (dimensioni della stanza, posizioni di sorgenti e ricevitori, caratteristiche di riflettività delle pareti...).

#### 1.4.3 CONFRONTO TRA SORGENTI VIRTUALI E RAY TRACING

La limitazione principale del metodo delle immagini è il test di visibilità, che deve essere effettuato dopo la costruzione di tutte le sorgenti immagine.

La limitazione principale del ray tracing è la mancanza di una regola per la scelta del numero di raggi e la dimensione del ricevitore. In particolare la dimensione dei ricevitori è un fattore critico e origina errori sistematici di tre tipi:

1. **errori di captazione multipla:** il numero di raggi captati dipende dalla posizione reciproca di sorgente e ricevitore.

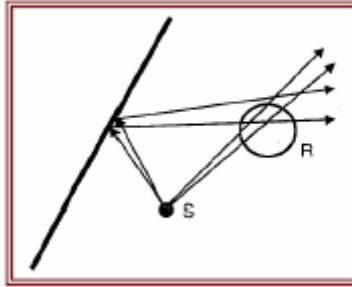


Figura 1.23: Esempio di captazione multipla

2. **errori di captazione variabile:** un piccolo spostamento del ricevitore causa una notevole variazione dell'energia ricevuta.

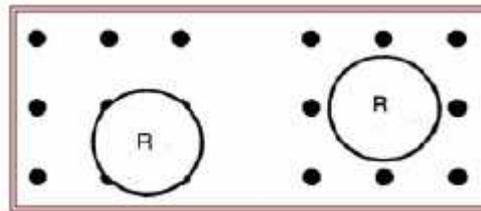
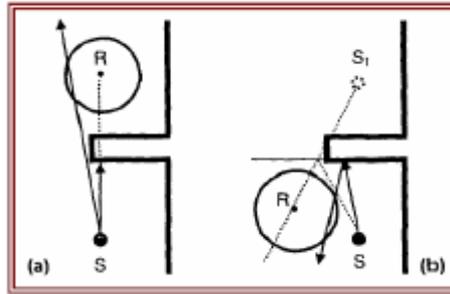


Figura 1.24: esempio di captazione variabile. Dato un fascio uniformemente distribuito di raggi sonori (schematizzati in sezione come punti) il ricevitore R ne intercetta un numero variabile in funzione di un leggero spostamento.

2. **errori di captazione non valida:** un piccolo spostamento del ricevitore causa una notevole variazione dell'energia ricevuta.



**Figura 1.25: Esempio di captazione geometricamente non valida.; S, sorgente; R, ricevitore. A)La sorgente è schermata. B)il punto di riflessione non giace sulla superficie.**

Questi errori possono essere minimizzati ad esempio scegliendo il raggio del ricevitore in base alla relazione:

$$r_m = L^* \sqrt{\frac{2\pi}{J_0}} \quad (1.32)$$

dove  $L^*$  = cammino massimo dei raggi.

Tale relazione a parità di cammino massimo e numero di raggi emessi garantisce una percentuale di captazione superiore al 99%.

Il confronto tra i due metodi deve tenere conto di due fattori: tempo di calcolo e precisione raggiungibile. Questi fattori possono essere espressi in funzione del numero massimo di riflessioni. Nella pratica il metodo delle immagini risulta più veloce quando il numero di riflessioni è basso e la precisione richiesta è ridotta ( $\pm 2$  dB).

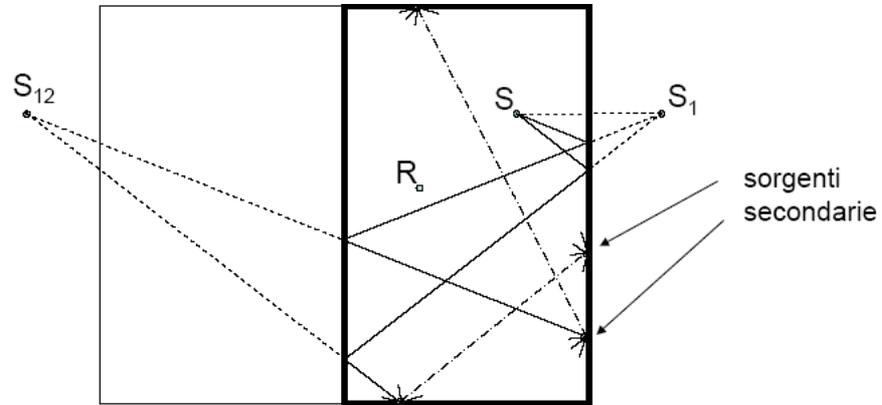
Nel caso invece di numero elevato di pareti e/o riflessioni e di assorbimento delle pareti non elevato conviene utilizzare il ray tracing, che fornisce tempi di calcolo e precisione comunque soddisfacenti.

Le limitazioni dei metodi considerati ha portato allo sviluppo di metodi ibridi, che ne combinano le caratteristiche migliori.

In questo metodo le riflessioni di ordine basso (early reflections) vengono modellate mediante il metodo delle immagini, mentre la coda del riverbero (late reflections) mediante sorgenti secondarie posizionate sulle pareti nei punti delle ultime riflessioni. Le sorgenti secondarie sono a tutti gli effetti delle nuove sorgenti.

In figura 1.29 si esemplifica il metodo delle immagini per le riflessioni fino al secondo ordine.

Oltre il secondo ordine ogni raggio genera sorgenti secondarie indipendenti che (se visibili) contribuiscono al campo sonoro nel ricevitore R.



**Figura 1.26: Esempio di modello ibrido.**

## CAPITOLO 2

### **“TORRE DELL’ACQUA: MISURA ED ANALISI DELLO STATO DI FATTO”**

Una buona progettazione acustica ha come obiettivo quello di esaltare le caratteristiche acustiche di un ambiente in base alla predefinita destinazione d’uso.

E’ possibile semplificare due grandi categorie di ambienti: quelli destinati all’ascolto della musica e quelli destinati all’ascolto del parlato. Per ciascuno di questi ambiti sono stati individuati dei criteri per la definizione della qualità acustica tenendo in considerazione le caratteristiche soggettive legate all’ascolto.

L’individuazione della qualità acustica è strettamente legata al concetto di benessere acustico definito come quella condizione psicofisica per cui l’individuo, immerso nel campo sonoro, esprime un giudizio positivo nei confronti di esso, in relazione all’attività che sta svolgendo.

La qualità acustica di un ambiente può essere valutata utilizzando dei parametri che riescono a relazionare le variazioni fisiche del campo sonoro in cui si trova l’ascoltatore con le variazioni del giudizio personale dello stesso.

Il successo è determinato dal raggiungimento di un appropriato equilibrio tra le qualità soggettive che tali parametri rappresentano. Nella tabella sono sintetizzati gli aspetti soggettivi, il o i relativi descrittori, la banda del segnale sorgente, la risoluzione minima significativa della misura (Just Noticeable Difference, JND) e l’ambito dei risultati definiti dalla norma ISO 3382[8].

Aspetti soggettivi	Descrittori	Frequenze (Hz)	JND	Valori tipici
<b>Livello sonoro soggettivo</b>	Sound Strength, G, in dB	500 - 1000	1 dB	-2dB; +10 dB
<b>Riverberzione Percepita</b>	Early Decay Time	500 - 1000	Rel.5 %	1.0 s; 3.0 s
<b>Chiarezza percepita</b>	Clarity, C <sub>80</sub> , in dB	500 - 1000	1 dB	-5dB; +5dB
	Definition, D <sub>50</sub>	500 - 1000	0.05	0.3; 0.7
	Centre Time, T <sub>s</sub> , in ms	500 - 1000	10 ms	60ms; 260 ms
<b>Ampiezza apparente</b>	Early Lateral Energy Fraction, LF e LFC	125 - 1000	0.05	0.05; 0.35
<b>Avvolgimento sonoro o "spaziosità"</b>	Late Lateral Sound Level, LG, in dB	125 - 1000	-	-14 dB; +1 dB

Tabella 2.1: Descrittori degli aspetti soggettivi secondo la ISO 3382-1.

## 2.1 PRESENTAZIONE DEL CASE STUDY

La "Torre dell'acqua ( il fiume della conoscenza) " è un progetto promosso dal comune di Budrio ( Bologna) volto al recupero polifunzionale dell'ex Carico dell'Acqua.



Figura 2.1 : Visualizzazione (rendering) delle due torri dell'acqua.

La proposta progettuale intende trasformare le torri dell'acqua, ormai dismesse da circa venti anni, sottrarle ad un uso sporadico e limitato come avviene ora e restituirle ad un

uso costante e pubblico, identificandone così le potenzialità quale “luogo centrale” della città, di socializzazione, di “incontro multietnico” e di arricchimento culturale.

In particolare sono stati individuati i seguenti temi progettuali:

3. Restauro e recupero della Torre Alta e della Torre Bassa;
4. Recupero della Vasca interrata per struttura espositiva;
5. La possibile realizzazione di un terzo corpo di fabbrica di collegamento alle due torri;
6. Riqualificazione dell'area cortiliva e suo collegamento pedonale al viale;
7. Riqualificazione e integrazione dell'area col tessuto urbano circostante a memoria dell'antica cinta muraria e del fossato, fino alle torri angolari della cinta stessa .

L'obiettivo di questo lavoro è illustrare la progettazione degli interventi di correzione acustica della torre più bassa nella prospettiva di migliorare la qualità acustica all'interno e renderla utilizzabile come sala polifunzionale.

E' stato necessario individuare ed eliminare eventuali difetti acustici aggravati dal fatto che la struttura è fatta interamente di cemento.

La torre è di forma ottagonale e si mantiene tale fino a circa 4 metri di altezza, poi viene ad assumere una forma circolare, un cordolo di circa 3 metri. Ha un doppio soffitto circolare munito di un buco centrale. Ogni parete è dotata di un finestrone semicircolare.



**Figura 2.2: La torre bassa vista da dentro, a sinistra, e vista dall'esterno, a destra.**

## 2.2 DETERMINAZIONE SPERIMENTALE DELLE CARATTERISTICHE ACUSTICHE ATTUALI

### 2.2.1 STRUMENTAZIONE

Per valutare oggettivamente la situazione attuale della torre sono stati eseguiti accurati rilievi dell'ambiente. Per effettuare le misure in campo lo standard ISO 3382 prescrive una sorgente isotropica costituita da una serie di altoparlanti (12), un dodecaedro.

La sorgente sonora deve essere scelta con caratteristiche di emissione più omnidirezionali possibile[8]. Sono previsti valori massimi di tolleranza sulla direzionalità della sorgente, in funzione della frequenza, come media ogni 30° attorno alla sorgente stessa.

Frequenza, Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Deviazione massima, dB	+/-1	+/-1	+/-1	+/-1	+/-1	+/-1

**Tabella 2.2: Deviazione massima dalla condizione di omnidirezionalità per le sorgenti secondo la ISO 3382.**

La distribuzione dell'energia sonora prodotta dal dodecaedro all'interno dell'ambiente di misura dovrà essere il più possibile omogenea al fine di ottenere in ogni punto dell'ambiente un campo riverberato; per questo motivo la sorgente è detta isotropica e produce un campo sonoro isotropico. Inoltre per la misura del tempo di riverberazione è necessario registrare il decadimento dell'energia sonora o una differenza di livello di almeno 30dB (T30) per ogni banda di frequenza, la sorgente dovrà essere in grado di emettere un livello di rumore sufficiente a superare il rumore ambientale di almeno 35dB per ogni banda di frequenza.

La ISO 3382 raccomanda che le misure siano prese in sei bande di ottava, da 125 Hz a 4000 Hz anche se la banda relativa ai 4000 Hz genera due complicazioni: la prima riguarda il tempo di riverbero che è sensibile all'assorbimento dell'aria (determinato dalla temperatura e dall'umidità relativa) mentre la seconda è relativa all'altoparlante dodecaedrico (diametro dell'ordine dei 400 mm) che a questa frequenza diventa

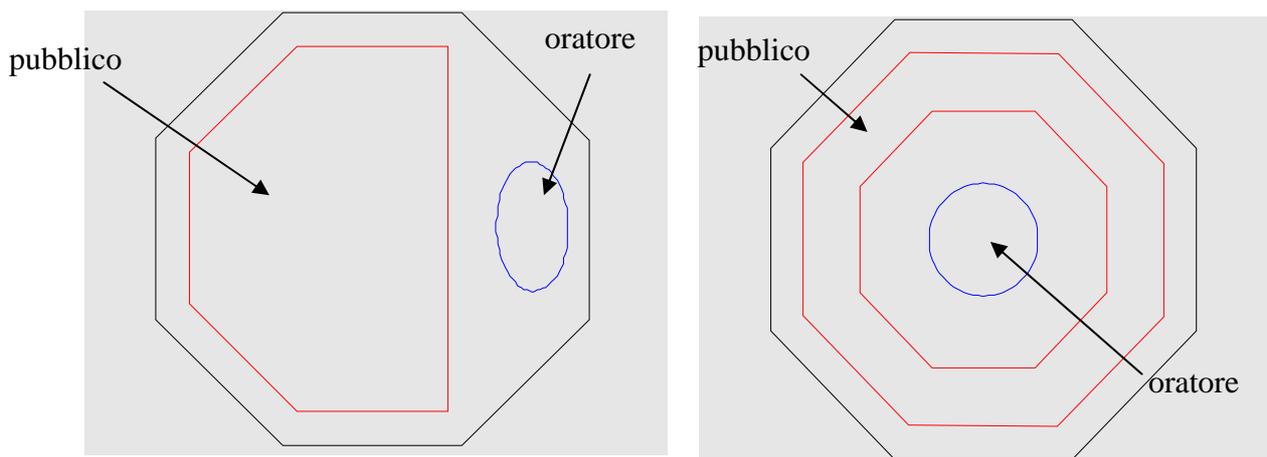
direzionale (stesso problema lo si ha a 63Hz). Si potrebbe compensare facendo diverse misure con diverse direzioni dell'altoparlante ma si tratterebbe solo di perdere del tempo. Behler e Muller hanno risolto questo problema usando un dodecaedro di 100 mm di diametro per le misure alle alte frequenze. Mentre Barron [3] considera le misure solo in cinque bande di ottava, da 125 Hz a 250 Hz (regione della bassa frequenza) e da 500 a 2000 Hz (regione della media-alta frequenza).

### 2.3 Posizioni di misura

E' indispensabile considerare un adeguato numero di posizioni della sorgente e di punti di rilevazione microfonica al fine di conoscere i valori e la distribuzione all'interno dei parametri acustici più significativi.

Le posizioni della sorgente devono essere scelte in modo da simulare le effettive posizioni in cui si troveranno oratori, singoli esecutori...( a seconda della specifica destinazione d'uso).

Il progetto acustico della sala in questione è stato differenziato in funzione delle due destinazioni d'uso, sala conferenza o sala per ascolto di musica.



**Fig 2.3: Schematizzazione delle due possibili destinazioni d'uso della sala**

Tipicamente deve essere previsto un numero minimo di due o tre posizioni della sorgente.

Per la prima campagna di misure la sorgente è stata messa in posizione S1 e successivamente spostata in S7 ( vedi fig. 2.4). Il numero minimo di misurazioni varia in base alla capienza della sala.

La norma ISO suggerisce un numero minimo di punti microfonici in relazione alle dimensioni della sala e quindi alla capienza secondo la seguente classificazione:

Numero di posti	Numero minimo di punti microfonici
500	6
1000	8
2000	10

**Tabella 2.3: Numero minimo di posizioni di misura in funzione del numero di posti della sala.**

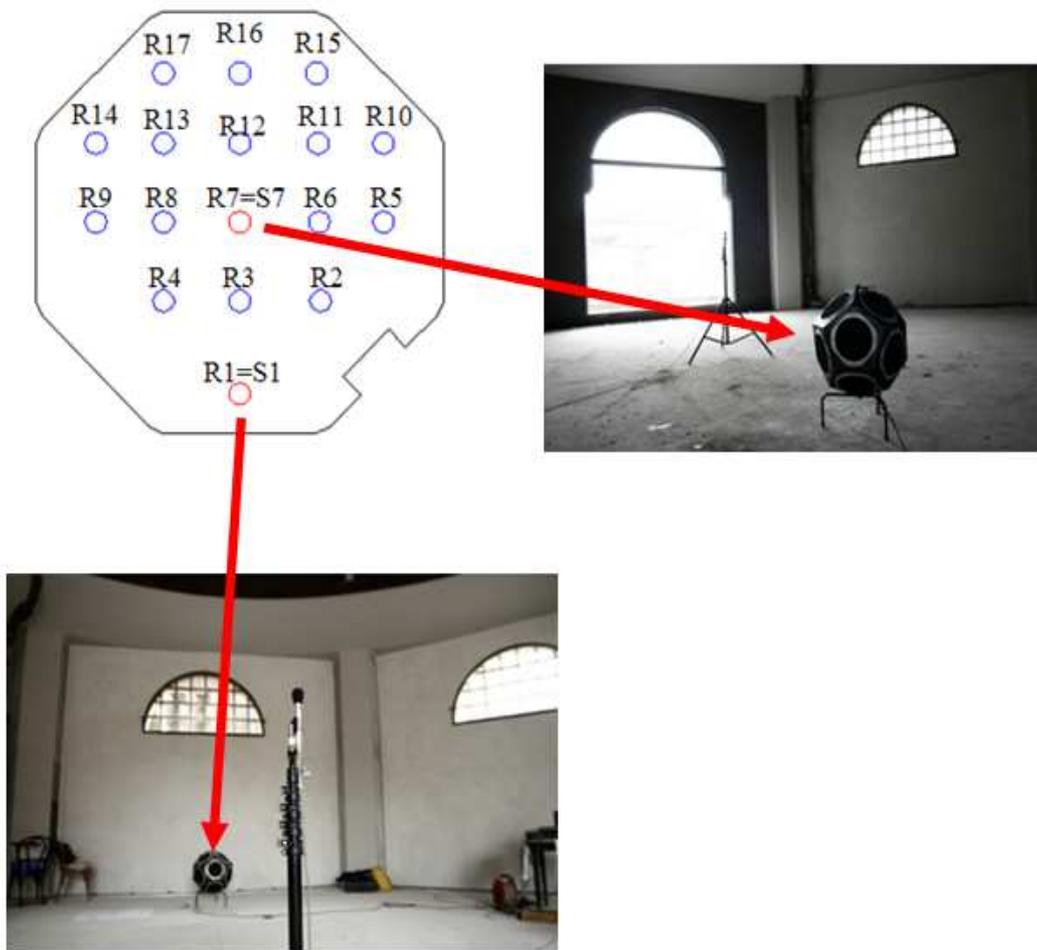
Per ogni posizione della sorgente sono state effettuate misure in 17 punti di rilievo distribuiti in modo uniforme, distanziati uno dall'altro 2.5 metri e posti ad un'altezza di 1.20 metri dal pavimento (che corrisponde all'altezza media dell'orecchio di un ascoltatore seduto).

Le posizioni dei punti di ricezione devono essere rappresentativi delle posizioni rappresentate dal pubblico e da esecutori e oratori

Inoltre la sala è perfettamente simmetrica rispetto alla linea centrale quindi i punti di misura possono essere collocati solo da una parte, tenendo conto delle opportune simmetrie anche nella collocazione dei punti sorgente.

Non devono essere previsti punti di misura troppo vicini alla sorgente per evitare un'eccessiva influenza del campo diretto e di conseguenza misure poco significative per qualificare l'ambiente di ascolto. La distanza minima può essere calcolata con la relazione  $d_{\min} = 2\sqrt{(V/CT)}$ , dove  $V$  è il volume in metri cubi,  $c$  è la velocità del suono in metri al secondo e  $T$  un valore stimato del tempo di riverberazione in secondi. Normalmente può essere opportuna una distanza minima di circa 3 metri.

La norma ISO invece non specifica la distanza minima tra le posizioni di misura e la sorgente. Barron propone quindi il raggio di riverberazione (il luogo geometrico in cui il campo diretto e il campo riverberato hanno lo stesso livello) come indicatore dello spazio in cui posizionare i microfoni e suggerisce una distanza minima dalla sorgente che sia 2.5 – 1.4 volte il raggio di riverberazione.



**Figura 2.4:** Disposizione dei 17 punti di misura nella sala e delle due sorgenti. Per la prima serie di misure la sorgente è stata collocata in S1 successivamente spostata al centro in posizione S7.

### 2.2.3 ELABORAZIONE DATI

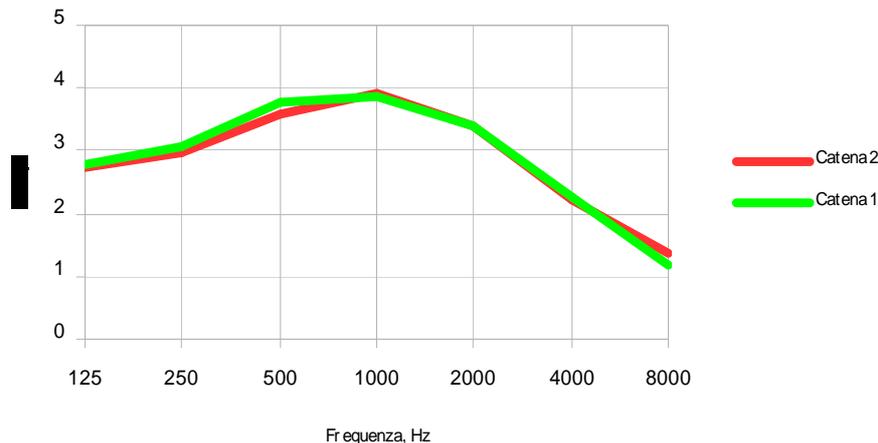
Sono state usate due diverse catene di misura: la prima basata sul sistema stand alone Symphonie della 01dB, la seconda realizzata dal gruppo di acustica del D.I.E.N.C.A.. La scelta di usare due catene permette di controllare l'incertezza di misura e di verificare la significatività dei dati.

Il segnale captato dal microfono viene inviato ad un sistema di elaborazione che conta di un alimentatore, un pre-amplificatore, un convertitore analogico-digitale del segnale ed infine tramite software è stato possibile ottenere la risposta all'impulso relativa ai punti di misurazione.

Dall'elaborazione delle risposte all'impulso sono stati ricavati i valori dei seguenti parametri acustici: parametri acustici:

3. Tempo di riverbero in bande di ottava;
4. Indice di chiarezza C50 e C80;
5. Tempo Baricentrico Ts;
6. Speech Transmission Index (STI);
7. Tempo di primo decadimento (EDT);
8. Livello Sonoro relativo al Livello di potenza (G,strenght).

Le due catene di misurazione hanno fornito risultati confrontabili. Un esempio viene dato dall'indice EDT (fig.2.5).



**Figura 2.5: Andamento medio dell'indice EDT. Le due catene forniscono valori molto simili tra loro.**

I valori ottenuti denunciano una scarsa qualità acustica. Infatti risultano del tutto inadatti per un buon ascolto sia della parola che della musica. La chiarezza è molto scarsa, come mostrato in tabella 2.4, 2.5, 2.10, 2.11 e nelle figure 2.5, 2.6, 2.7, 2.8. L'indice EDT mostra valori elevati (tab. 2.6, 2.12 e mappe 2.9, 2.10, 2.11, 2.12). Il tempo baricentrico e il tempo di riverbero, RT30, sono abbastanza elevati, come mostrato rispettivamente nella tabella 2.7, 2.13 e 2.9 e nelle mappe 2.13, 2.14, 2.15, 2.16, 2.18, 2.19. L'indice STI denuncia un'insufficiente intelligibilità del parlato come mostra la tabella 2.8 e la rispettiva mappa 2.17.

Ricevitori	M3	M4	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17
Frequenza	C50													
Hz	dB													
125	-1,48	0,37	-4,05	-3,41	-4	-2,39	-3,60	-6,25	5,71	-8,72	-4,35	-3,23	-4,66	-6,06
250	-1,00	-0,82	-2,88	-1,78	-3,83	-4,20	0,35	-3,36	-1,73	-5,02	0,00	-2,64	-3,52	-4,70
500	-6,72	-2,84	-5,25	-6,21	-4,13	-5,27	-1,41	-3,11	-2,75	-4,27	-3,48	-3,36	-5,41	-3,48
1000	-2,57	-4,54	-7,56	-8,04	-7,73	-7,04	-5,54	-6,67	-5,26	-5,62	-3,26	-6,57	-5,25	-3,92
2000	-4,35	-2,58	-3,81	-6,45	-5,21	-6,16	-6,45	-6,87	-4,75	-6,01	-2,81	-7,72	-3,63	-5,33

**Tabella 2.4: Valori nello stato di fatto dell'indice di chiarezza  $C_{50}$  (catena 2) alle diverse frequenze per la sorgente S1.**

Ricevitori	M3	M4	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17
Frequenza	C80													
Hz	dB													
125	-1.21	0.00	-2.61	-2.84	-3.13	-1.64	-2.62	-2.79	-2.03	-1.58	-2.79	0.47	0.36	-2.94
250	-0.29	0.70	-1.67	-1.15	-2.01	-2.25	0.84	-1.42	-1.19	-2.92	0.66	-0.95	0.41	-3.06
500	-5.44	-1.92	-3.59	-4.83	-2.76	-3.37	-0.29	-1.76	-1.02	-2.09	-1.60	-0.95	-2.64	-1.29
1000	-2.04	-3.44	-5.67	-5.78	-5.50	-5.14	-4.02	-3.28	-2.92	-3.60	-1.94	-1.78	-1.15	-2.19
2000	-3.83	-1.49	-2.86	-5.15	-3.61	-4.43	-4.28	-4.03	-2.98	-3.90	-1.24	-2.77	-0.29	-2.67

**Tabella 2.5: Valori nello stato di fatto dell'indice di chiarezza  $C_{80}$  (catena 2) alle diverse frequenze per la sorgente S1.**

Ricevitori	M3	M4	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17
Frequenza	EDT													
Hz	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s
125	2,82	2,65	3	3,57	2,91	2,57	2,78	3,18	3,12	2,69	2,36	2,4	1,92	2,25
250	2,92	3,31	3,34	3,46	3,4	3	2,76	3,4	2,84	2,93	3,3	2,69	2,17	2,25
500	3,91	3,51	3,94	3,83	3,94	3,63	3,5	3,77	3,3	3,54	3,74	3,4	2,98	2,62
1000	3,68	4,21	4,34	4,21	4,23	3,72	4,17	4,27	3,71	4,03	3,93	3,47	3,26	3,31
2000	3,27	3,46	3,74	3,44	3,88	3,26	3,38	3,63	3,39	3,57	3,22	3,15	2,48	3,61

**Tabella 2.6: Valori nello stato di fatto dell'indice di primo decadimento, EDT (catena 2) alle diverse frequenze per la sorgente S1.**

Ricevitori	M3	M4	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17
Frequenza	Ts													
Hz	ms													
125	236.39	155.67	213.27	236.25	216.18	173.96	197.76	227.80	213.53	195.06	179.53	151.42	153.19	178.54
250	181.38	171.01	211.88	216.53	230.31	188.12	146.32	211.09	188.64	210.61	155.59	180.23	153.66	192.21
500	169.39	223.80	280.02	296.68	248.25	239.22	196.57	245.92	218.48	234.73	227.60	203.37	213.65	209.41
1000	291.96	269.12	322.32	317.90	310.30	266.10	278.22	291.56	260.67	282.45	249.00	232.69	209.89	238.60
2000	214.06	207.53	244.96	264.92	259.14	237.57	253.30	265.87	239.26	255.87	203.35	239.91	171.87	218.68

**Tabella 2.7: Valori nello stato di fatto del tempo centrale Ts (catena 2) alle diverse frequenze per la sorgente S1.**

M3	M4	M6	M7	M8	M9	M12	M13	M14	M16	M17
STI	STI	STI	STI	STI	STI	STI	STI	STI	STI	STI
0,47	0,46	0,41	0,39	0,4	0,42	0,44	0,43	0,47	0,49	0,46

**Tabella 2.8: Valori nello stato di fatto dell'indice STI (catena 1) per la sorgente S1.**

Ricevitori	M3	M4	M6	M7	M8	M9	M12	M13	M14	M16	M17
Frequenza	T30	T30	T30	T30	T30	T30	T30	T30	T30	T30	T30
Hz	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s
125	6,4	5,3	6,78	8,29	6,63	3,8	7,07	4,98	4,09	4,23	4,02
250	8,52	5,38	10,22	8,37	10,38	4,54	10,2	6,94	4,74	4,94	4,88
500	10,8	9,59	9,65	11,1	8,88	6,39	10,5	8,12	6,31	5,97	5,69
1000	7,53	7,23	8,01	7,75	8,22	6,7	8,05	8,08	6,17	6,14	6,24
2000	6,07	6,11	6,09	6,72	5,98	5,99	5,95	5,89	5,29	5,63	5,54

**Tabella 2.9: Valori nello stato di fatto del tempo di riverberazione T30 (catena 1) alle diverse frequenze per la sorgente S1.**

Ricevitori	M1	M3	M4	M5	M6	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17
Frequenza	C50														
Hz	dB														
125	-4,87	-2,28	-3,98	-5,08	-1,17	-0,47	-0,33	-1,26	-4,54	-2,04	-2,82	-1,26	-1,82	-4,66	-1,05
250	-2,92	-2,79	-2,18	-4,33	-0,28	-1,65	-1,3	-3,06	-2,92	-0,95	-3,52	-2,21	-2,57	-3,52	-2,02
500	-5,41	-5,76	-7,03	-5,35	-5,66	-5,5	-6,65	-5,19	-5,56	-4,4	-4,94	-6,54	-6,06	-5,41	-4,14
1000	-8,07	-5,49	-5,33	-8,44	-3,71	-5,06	-9,44	-9,15	-4,44	-4,21	-4,75	-7,96	-8,43	-5,25	-9,27
2000	-6,76	-2,11	-3,1	-6,32	-6,34	-4,35	-9,36	-6,05	-6,75	-6,79	-5,04	-6,93	-6,66	-3,63	-6,99

**Tabella 2.10: Valori nello stato di fatto dell'indice di chiarezza C50 (catena 2) alle diverse frequenze per la sorgente S7.**

Ricevitori	M1	M3	M4	M5	M6	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17
Frequenza	C80														
Hz	dB														
125	-3,66	-1,5	-2,08	-3,95	-0,1	0	1,21	-0,41	-2,71	-1,11	-1,32	0,19	-0,47	0,36	0,09
250	-2,18	-1,91	-1	-3,09	0,34	-1,11	-0,79	-2,06	-0,99	0,16	-2,14	-1,47	-0,87	0,41	-0,1
500	-4,34	-4,29	-5,63	-3,76	-4	-4,61	-5,43	-3,07	-3,73	-3,45	-3,21	-3,87	-3,87	-2,64	-2,41
1000	-6,19	-4,1	-3,9	-6	-2,84	-3,17	-6,07	-5,3	-3,09	-2,85	-3,43	-5,83	-5,87	-1,15	-7,14
2000	-5,07	-1,32	-2,05	-4,53	-4,71	-3,22	-6,47	-4,73	-4,93	-4,79	-3,56	-5,01	-5,13	-0,29	-4,74

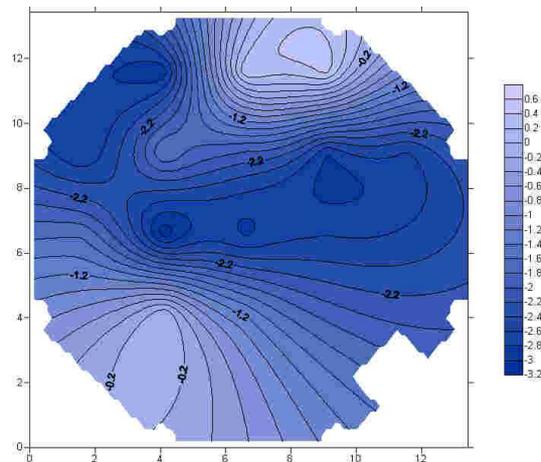
**Tabella 2.11: Valori nello stato di fatto dell'indice di chiarezza C80 (catena 2) alle diverse frequenze per la sorgente S7.**

Ricevitori	M1	M3	M4	M5	M6	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17
Frequenza	EDT														
Hz	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s
125	3,5	3,8	2,99	2,56	4,75	4,22	2,2	3,4	4,28	3,81	2,72	2,94	3,26	1,92	3,46
250	3,14	4,6	2,9	2,63	4	3,72	2,52	3,31	3,31	4,86	3,04	3,11	3,32	2,17	3,68
500	4,13	5,5	3,97	3,58	5,96	5,55	3,79	4	3,87	6,2	4,05	4,09	3,85	2,98	3,44
1000	3,88	4,53	4,39	4,12	5,32	4,88	4	4,35	4,6	4,73	4,66	4,16	4,26	3,26	4,1
2000	3,31	4	3,76	3,8	3,95	3,77	3,55	3,57	3,67	3,89	3,88	3,6	3,61	2,48	3,62

**Tabella 2.12: Valori nello stato di fatto dell'indice del tempo di primo decadimento EDT (catena 2) alle diverse frequenze per la sorgente S7.**

Ricevitori	M1	M3	M4	M5	M6	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17
Frequenza	Ts	Ts	Ts	Ts	Ts	Ts	Ts	Ts	Ts	Ts	Ts	Ts	Ts	Ts	Ts
Hz	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms	ms
125	236,6	237,7	215,5	216	248,3	226	138,09	184,4	260,8	255,78	188,7	168,1	199,2	153	197
250	204,8	304,6	195,8	203	237,1	254,7	161,6	214,2	206	267,07	202,1	198	205,1	154	204
500	293,8	381,1	320,8	272	394,3	353,6	297,73	269,7	296,4	385,99	287,3	276	280,3	214	251
1000	299,4	313,8	299,9	331	303,1	310,5	327,46	322,7	294,5	292,25	311,1	315,5	323,1	210	329
2000	250,3	225,6	216	270	282,9	242,6	302,24	265,4	270	288,74	260,6	270,2	279,7	172	274

**Tabella 2.13: Valori nello stato di fatto del tempo baricentrico (catena 2) alle diverse frequenze per la sorgente S7.**



**Figura 2.5: Mappa dell'indice di chiarezza  $C_{80}$  nello stato di fatto per la sorgente S1 a 125 Hz (catena2)**

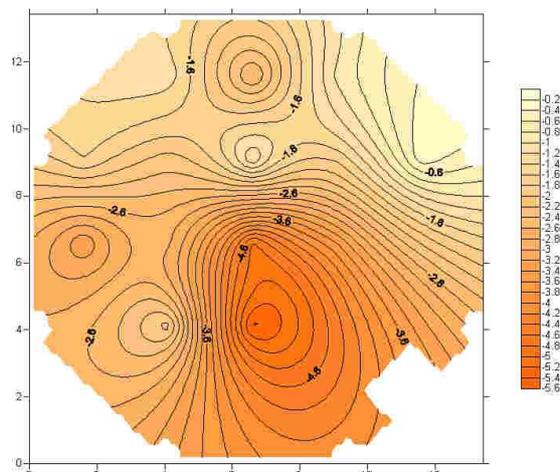


Figura 2.6: Mappa dell'indice di chiarezza  $C_{80}$  nello stato di fatto per la sorgente S1 a 500 Hz (catena2)

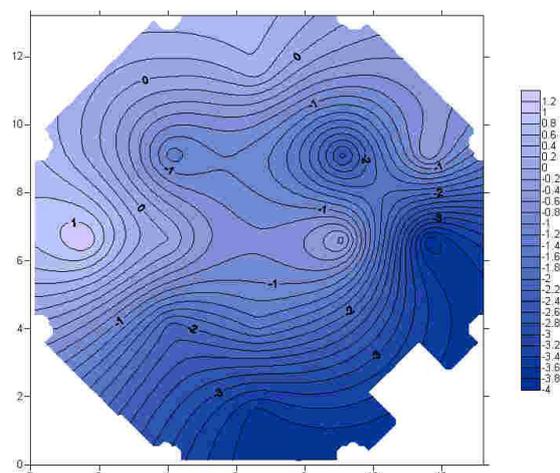


Figura 2.7: Mappa dell'indice di chiarezza  $C_{80}$  nello stato di fatto per la sorgente S7 a 125 Hz (catena2)

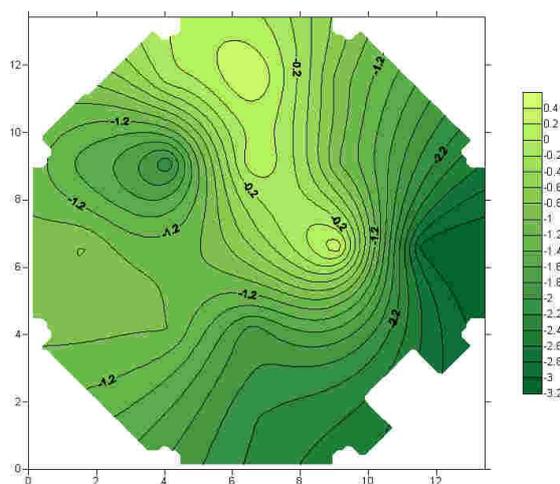


Figura 2.8: Mappa dell'indice di chiarezza  $C_{80}$  nello stato di fatto per la sorgente S7 a 250 Hz (catena2)

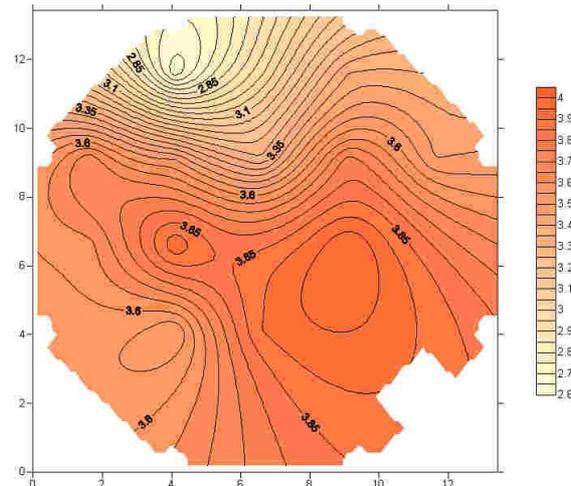


Figura 2.9: Mappa dell' indice EDT nello stato di fatto per la sorgente S1 a 500 Hz (catena 2)

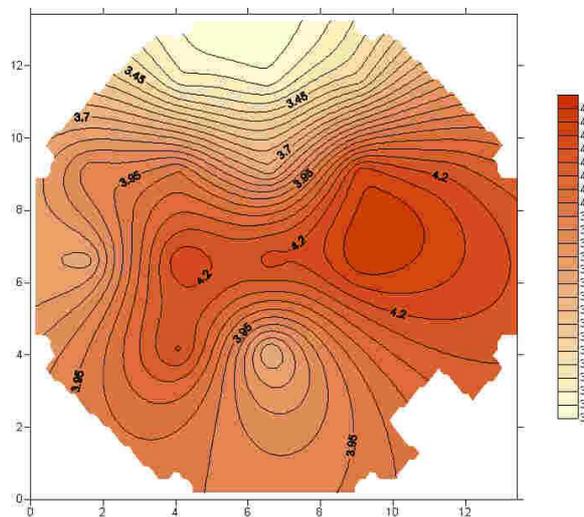


Figura 2.10: Mappa dell'indice EDT nello stato di fatto per la sorgente S1 a 1000 Hz (catena 2)

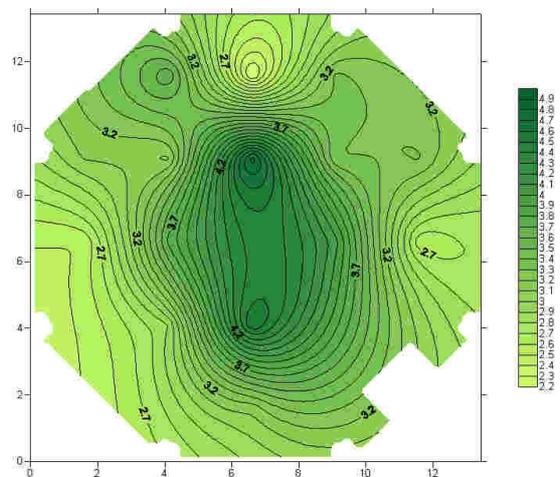


Figura 2.11: Mappa dell'indice EDT nello stato di fatto per la sorgente S7 a 250 Hz (catena 2)

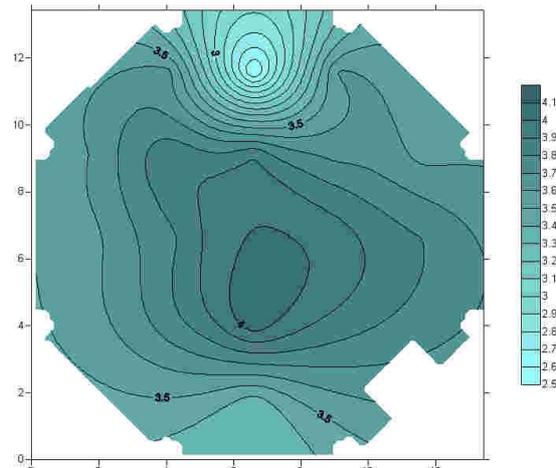


Figura 2.12: Mappa dell'indice EDT nello stato di fatto per la sorgente S7 a 2000 Hz (catena 2)

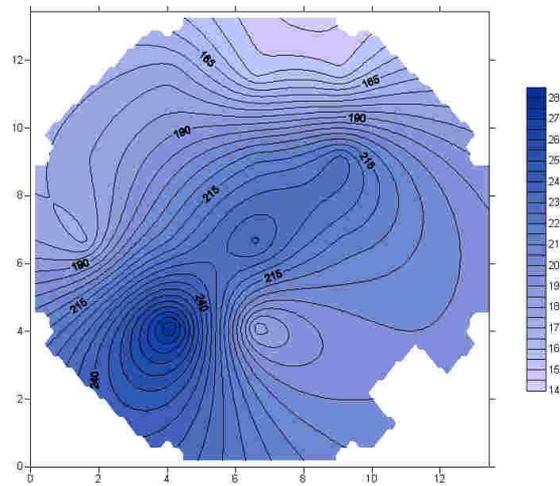


Figura 2.13: Mappa del tempo baricentrico  $T_s$  nello stato di fatto per la sorgente S1 a 125 Hz (catena 2)

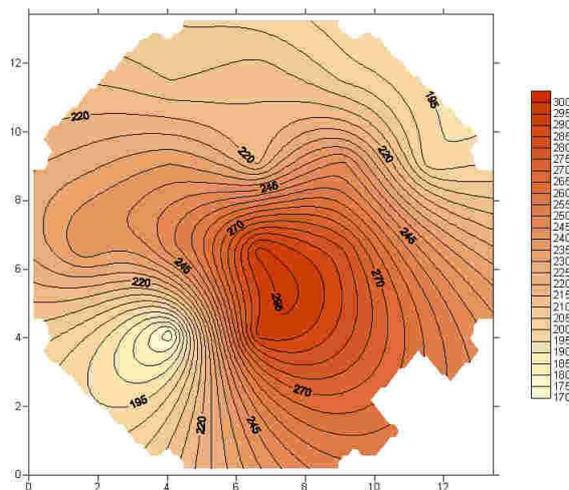


Figura 2.14: Mappa del tempo baricentrico  $T_s$  nello stato di fatto per la sorgente S1 a 500 Hz (catena 2)

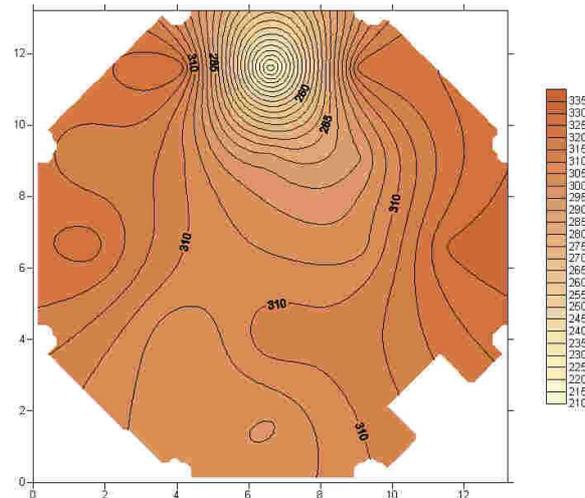


Figura 2.15: Mappa del tempo baricentrico  $T_s$  nello stato di fatto per la sorgente S7 a 1000 Hz (catena2)

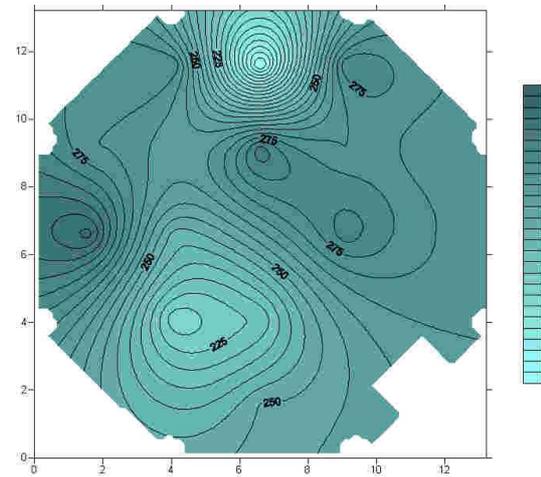


Figura 2.16: Mappa del tempo baricentrico  $T_s$  nello stato di fatto per la sorgente S7 a 2000 Hz (catena2)

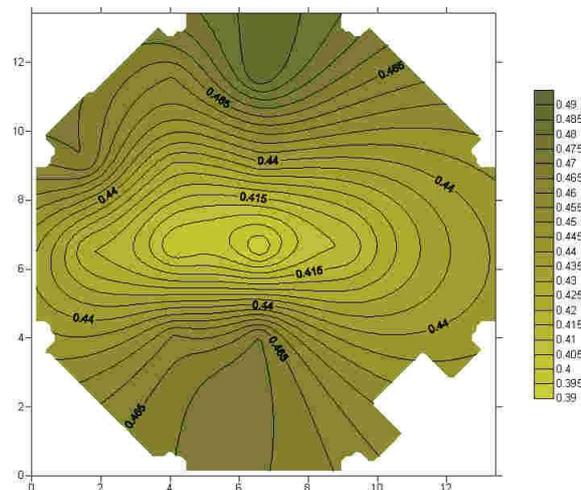
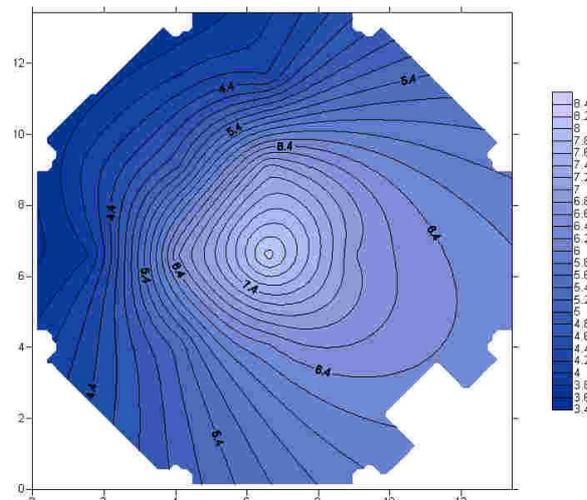
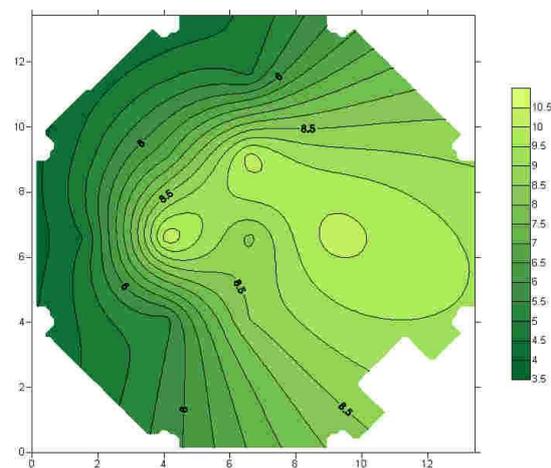


Figura 2.17: Mappa dell'indice STI nello stato di fatto per la sorgente S1 (catena 2)



**Figura 2.18:** Mappa del tempo di riverbero  $T_{30}$  nello stato di fatto per la sorgente S1 a 125 Hz (catena 1)



**Figura 2.19:** Mappa del tempo di riverbero  $T_{30}$  nello stato di fatto per la sorgente S1 a 250 Hz (catena 1)

## 2.3 SIMULAZIONE

### 2.3.1 DESCRIZIONE DEL SOFTWARE DI SIMULAZIONE ACUSTICA

Il supporto utilizzato nella fase progettuale consiste nella modellazione acustica dell'ambiente che può essere sviluppata mediante programmi di simulazione acustica.

E' stato utilizzato il software Odeon 9.0. Tale programma combina il metodo delle sorgenti immagine per le prime riflessioni (in genere fino al terzo ordine) e la tecnica del ray tracing per l'ultima parte della risposta all'impulso. Si inviano un certo numero di raggi all'interno della sala e ogni volta che un raggio viene riflesso da una parete si genera una seconda sorgente in corrispondenza del punto di riflessione. La sorgente secondaria avrà un'energia che dipende dall'assorbimento, dalla lunghezza del percorso fatto e da un certo ritardo relativo alla sorgente primaria. Ogni sorgente secondaria avrà una certa direttività data dalla legge di Lambert. Le riflessioni, in base al valore assunto dal coefficiente di scattering, possono essere speculari o diffuse.

Le sorgenti secondarie, se sono visibili al ricevitore, inviano le riflessioni al ricevitore dove sono "raccolte" e memorizzate. Il test di visibilità delle sorgenti è fatto tramite ray tracing, collegando il ricevitore con la seconda sorgente che si va a considerare.

La prima informazione necessaria al programma di previsione sonora è relativa alla definizione della geometria dell'ambiente oggetto di studio. Il modello deve contenere solo entità tridimensionali quindi è stato realizzato un modello tridimensionale dell'ambiente (in formato dxf) partendo da un disegno CAD in pianta della torre.

In questi modelli le componenti architettoniche vengono descritte con un grado di dettaglio che trascura in genere le parti più minute: questo va fatto sia per limitare il tempo di calcolo sia per le approssimazioni insite negli algoritmi del calcolo.

Sono da evitarsi anche superficie troppo piccole che in buona parte delle frequenze utili non rispettano le condizioni di validità dell'acustica geometrica. E' fondamentale assicurarsi che il modello non sia mancante di superfici, anche estremamente piccole, per evitare la fuoriuscita di raggi sonori che comprometterebbero l'affidabilità della simulazione.

Ai vari elementi che costituiscono il disegno sono state associate le caratteristiche acustiche dei materiali a cui questi si riferiscono. E' infatti ovvio che il software di

previsione necessari di conoscere i materiali presenti nell'ambiente al fine di poter considerare in maniera opportuna il comportamento delle onde sonore che incidono sulle pareti, sul pavimento o su una qualsiasi superficie presente.

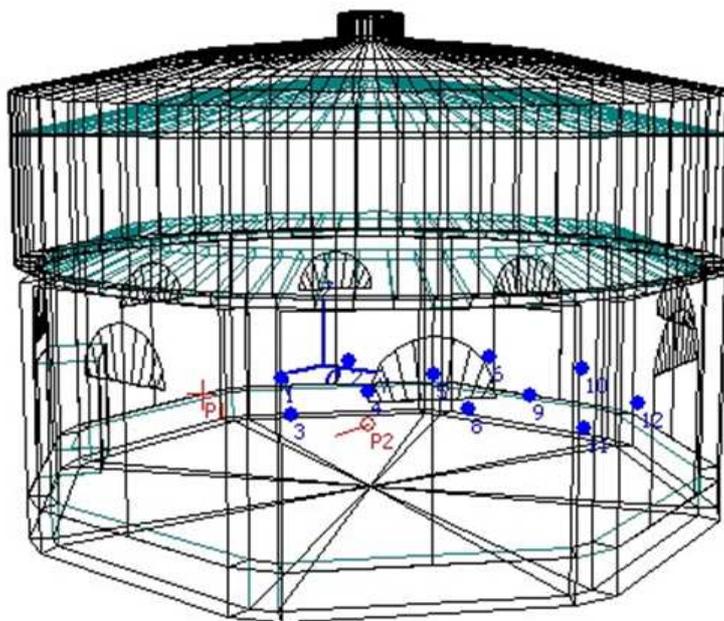
Per quanto riguarda i materiali di rivestimento vengono forniti database contenenti i dati acustici – coefficienti di assorbimento- di svariati materiali alle diverse bande di frequenza; inoltre possono essere aggiornati dall'utente con eventuali nuovi elementi di cui si conoscono le caratteristiche.

Modificando i materiali di rivestimento è possibile valutare direttamente l'adeguatezza degli interventi di trattamento fonoassorbente delle pareti.

Eseguita la definizione dell'ambiente, in termini di geometria e di materiali in essa contenuti, è necessario comunicare al programma la posizione, l'orientamento e le caratteristiche acustiche delle sorgenti sonore presenti e dei ricevitori.

I ricevitori e le sorgenti sono stati collocati nelle esatte posizioni in cui la stessa situazione era stata fatta oggetto di rilevamenti sperimentali.

La visualizzazione interattiva mostra la geometria, i materiali e la disposizione delle sorgenti e dei ricevitori in ambiente tridimensionale (3D) come mostrato in figura 2.33.



**Figura 2.20: 3VIEW**

### 2.3.2 CONFRONTO DATI SPERIMENTALI E DATI SIMULATI

I risultati ottenuti nelle simulazioni dello stato di progetto sono stati confrontati con i rilievi della situazione attuale tramite una serie di rappresentazioni in pianta della distribuzione dei valori dei parametri acustici considerati e rappresentazioni grafiche: ciò ha permesso una valutazione immediata e facilmente leggibile delle diverse configurazioni.

Tra le due famiglie di dati esiste una notevole discrepanza che ha portato a riconsiderare quanto fornito in ingresso al programma al fine di individuare e correggere le informazioni errate che hanno condotto a risultati non conformi.

## 2.4 TARATURA DEL MODELLO

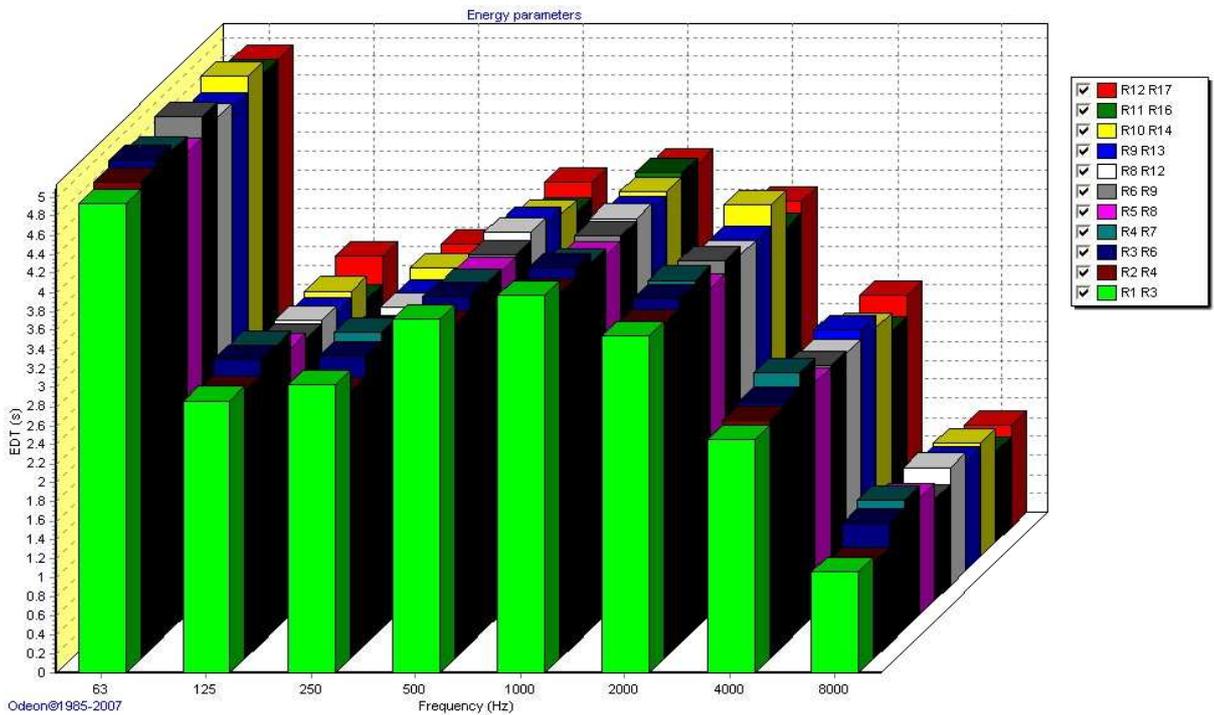
La disponibilità dei rilievi acustici è necessaria per la taratura del modello di previsione numerica: questa fase deriva dalla necessità di riprodurre fedelmente la realtà dello stato di fatto e ritrovare esattamente le condizioni di funzionamento dell'ambiente che si sta esaminando.

Una volta realizzato un modello matematico affidabile e quindi rappresentativo dell'ambiente considerato è possibile operare su questo e simulare eventuali modifiche (variazioni della geometria, dei materiali e della sorgente) al fine di prevedere come queste variazioni potranno influenzare il campo sonoro.

Per tarare il modello, analogamente a quanto indicato da Barron per la misura in opera dalla ISO 3382 [3], si è scelto di usare l'indice EDT e l'indice di chiarezza  $C_{80}$ .

### 2.4.1 PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

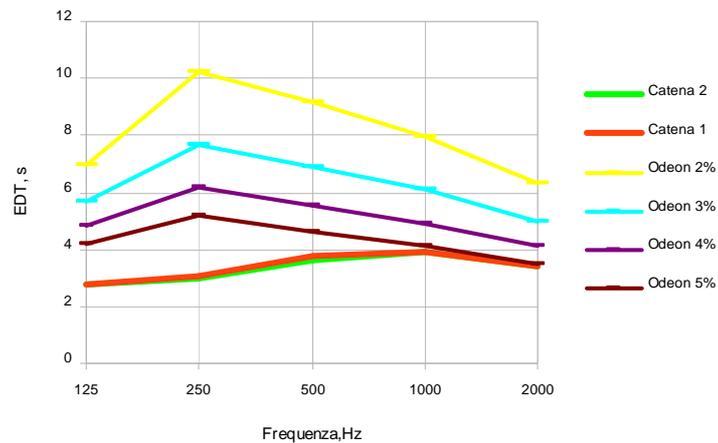
L'indice EDT, riferendosi ad una condizione di campo diffuso, presenta poche differenze nei diversi punti di misura (fig. 2.21). Si può quindi considerare mediante il suo valore medio.



**Figura 2.21: Andamento medio dell'indice EDT relativo ai ricevitori. Per ogni frequenza l'andamento si mantiene all'incirca costante**

Per fare convergere i valori della simulazione su quelli misurati è stato necessario modificare i valori del coefficiente di assorbimento dei materiali.

Si è partiti con il coefficiente di assorbimento generici per le superfici riflettenti dell'ambiente (pavimento, soffitto, pareti...), considerando valori costanti su tutto lo spettro di frequenze in esame. E' evidente discordanza alle basse frequenze tra i valori simulati e quelli sperimentali.

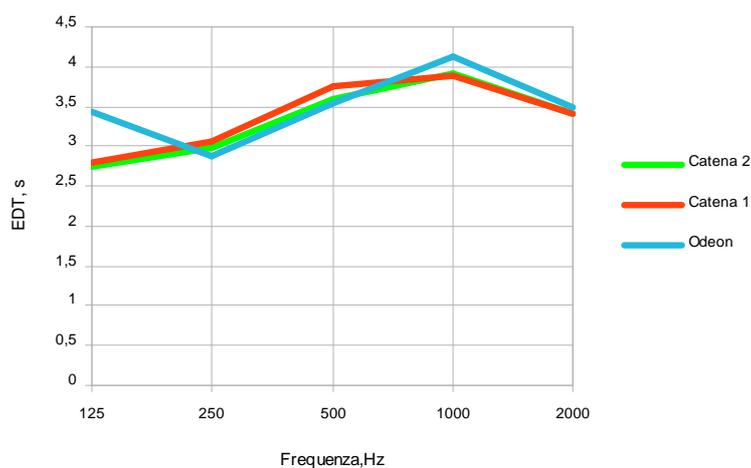


**Figura 2.22: Grafico di confronto valori nello stato di fatto e valori simulati.**

Impostati, per le superfici in cemento i valori riportati in tab. 2.14 si può vedere come la situazione sia progressivamente convergente (fig. 2.22) ad eccezione della zona relativa ai 125 Hz. (fig. 2.23).

Frequenza, Hz	125	250	500	1000	2000
Coefficiente assorbimento	0,07	0,10	0,07	0,05	0,05

**Tabella 2.14: Valori dei coefficienti di assorbimento per ogni banda di frequenza.**

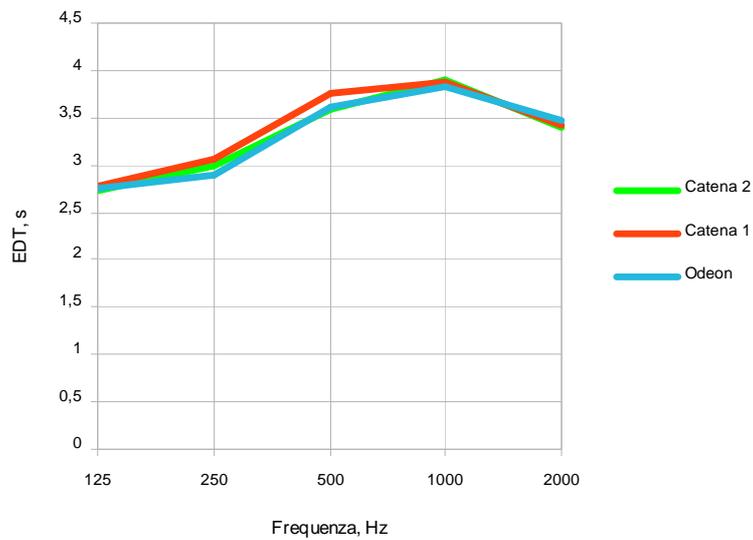


**Figura 2.23: Grafico di confronto tra valori nello stato di fatto e sperimentali**

Dopo successivi tentativi si è arrivati ai valori riportati in tab. 2.15, che permettono le curve EDT riportate in fig. 2.24.

Frequenza Hz	125	250	500	1000	2000
Coefficiente assorbimento	0,07	0,09	0,10	0,07	0,055

**Tabella 2.15: Valore dei coefficienti di assorbimento per ogni banda di frequenza.**



**Figura 2.24: Grafico di confronto valori nello stato di fatto e valori simulati**

Mantendo gli stessi coefficienti di assorbimento si verifica che anche per l'indice di chiarezza  $C_{80}$  i valori misurati e quelli sperimentali sono confrontabili.

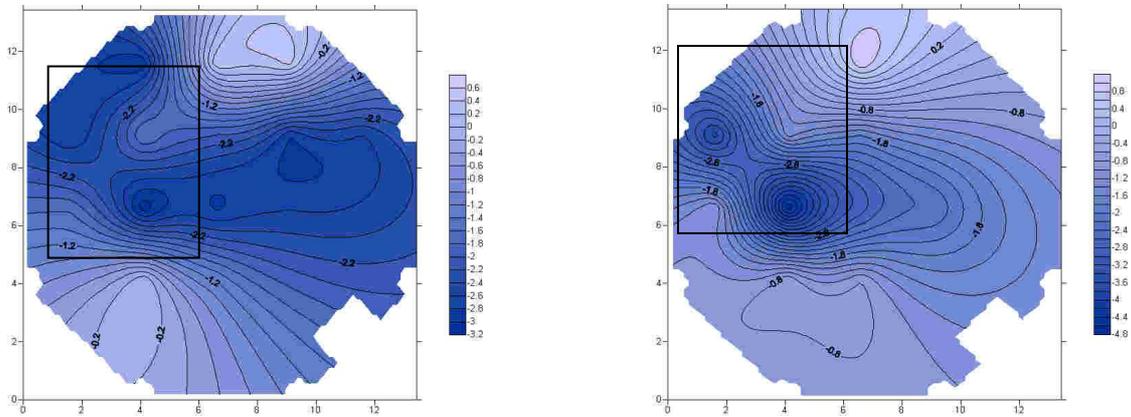


Figura 2.25: Confronto tra l'indice di chiarezza  $C_{80}$  nello stato di fatto e simulato a 125 Hz.

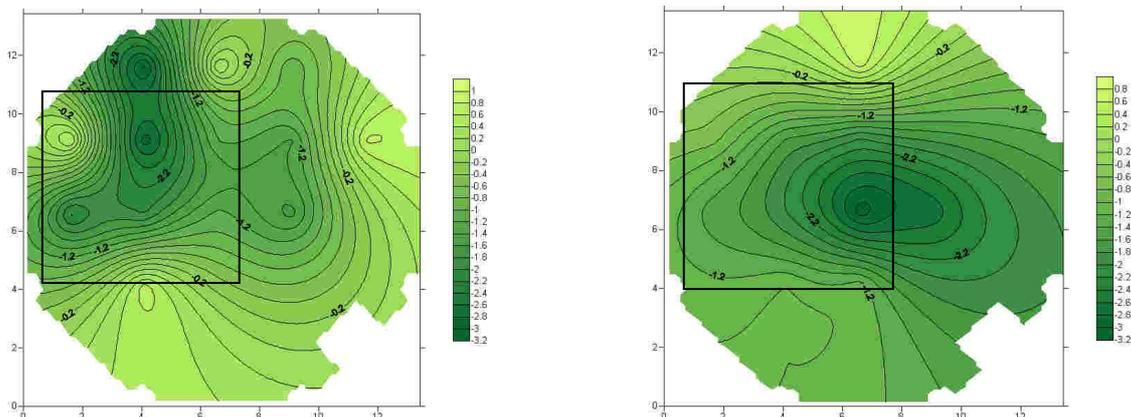


Figura 2.26: Confronto tra l'indice di chiarezza  $C_{80}$  nello stato di fatto e simulato a 250 Hz.

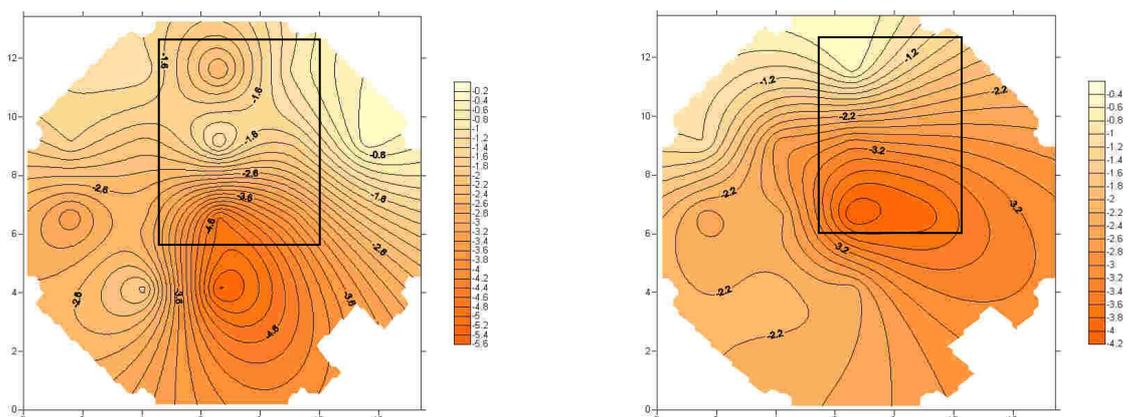


Figura 2.27: Confronto tra l'indice di chiarezza  $C_{80}$  nello stato di fatto e simulato a 500 Hz.

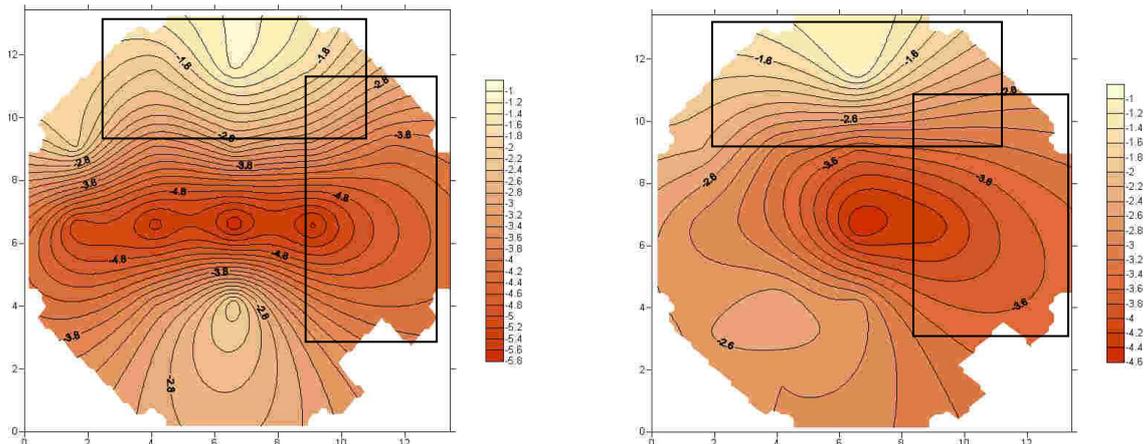


Figura 2.28: Confronto tra l'indice di chiarezza  $C_{80}$  nello stato di fatto e simulato a 1000 Hz.

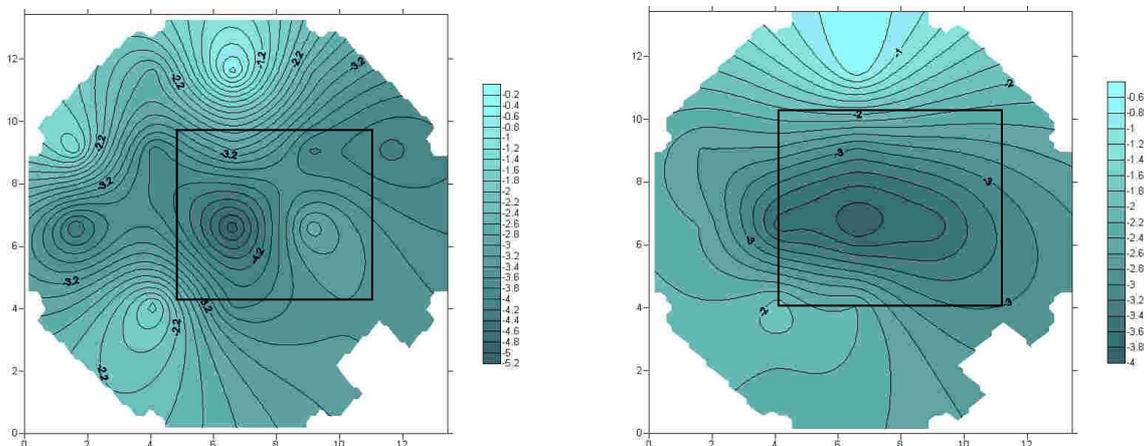


Figura 2.29: Confronto tra l'indice di chiarezza  $C_{80}$  nello stato di fatto e simulato a 2000 Hz.

#### 2.4.2 ANALISI REFLETTOGRAMMA

Per studiare l'effetto della forma della sala sulla distribuzione del suono e per identificare le superfici che possono eventualmente produrre echi indesiderati si può procedere inoltre all'analisi delle riflessioni mediante lo studio dell'ecogramma.

Questo tipo di analisi si rivela uno strumento molto importante per stabilire eventuali interventi da introdurre in modo da produrre riflessioni "utili", ossia con meno di 10 m di differenza di percorso rispetto al suono diretto. Si può far riferimento ai seguenti criteri [16]:

Differenza di percorso	Condizione di ascolto
Meno di 8,5 m	Eccellente per parola e musica
Da 8,5 a 12 m	Buona per la parola, povero per la musica
Da 12 a 15 m	Al limite dell'accettabile
Da 15 a 21 m	negativa
Oltre 21 m	intollerabile

**Tabella 2.16: Condizioni di ascolto relativi alla differenza di percorso tra suono diretto e riflessioni.**

La differenza di tempo, corrispondente alla differenza di percorso, con cui i suoni arrivano all'orecchio, determina gli effetti più rilevanti sulla percezione uditiva.

Sono riportati a titolo di esempio quattro riflettogrammi con i relativi percorsi dei raggi che interessano la sorgente centrale e tre ricevitori.

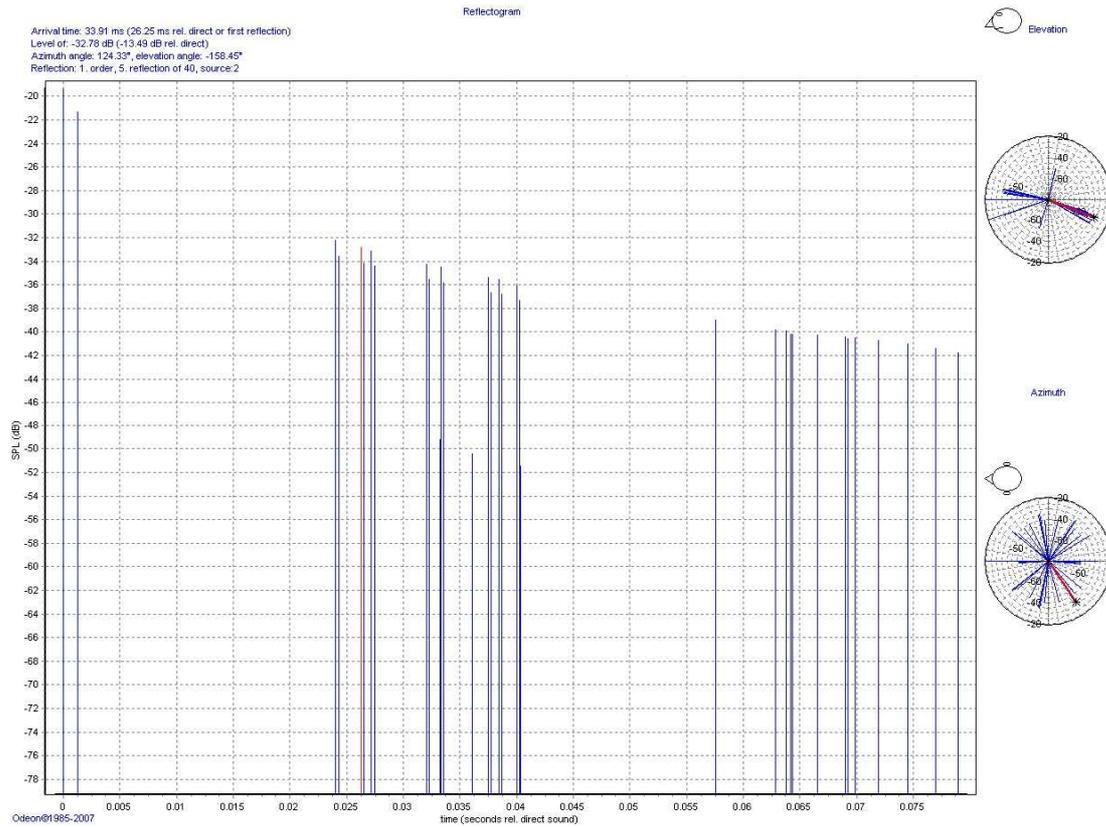
Per ogni riflettogramma viene riportato il tempo di arrivo della riflessione esaminata, il tempo di ritardo rispetto al suono diretto, il livello, l'ordine di riflessione e la direzione di provenienza (azimuth ed elevazione)

I primi due riflettogrammi (fig.2.30a, 2.31a) e i relativi percorsi dei raggi (fig.2.30b, 2.31b) si riferiscono alla sorgente centrale e al ricevitore 1.

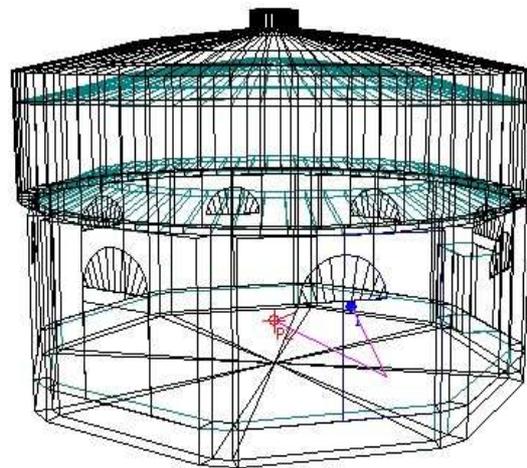
Mentre gli ultimi due (fig.2.32a, 2.33a) e le riflessioni corrispondenti (fig.2.32b, 2.33b) riguardano la sorgente centrale e il ricevitore 11.

Considerando una velocità pari a 340 m/s e noto il ritardo della riflessione rispetto al suono diretto è possibile ottenere la differenza di percorso. Inoltre, conoscendo la geometria dell'ambiente misurato, si riesce a risalire all'oggetto che ha provocato quella riflessione.

In corrispondenza di ogni parete dove avviene la riflessione si genera una sorgente immagine.



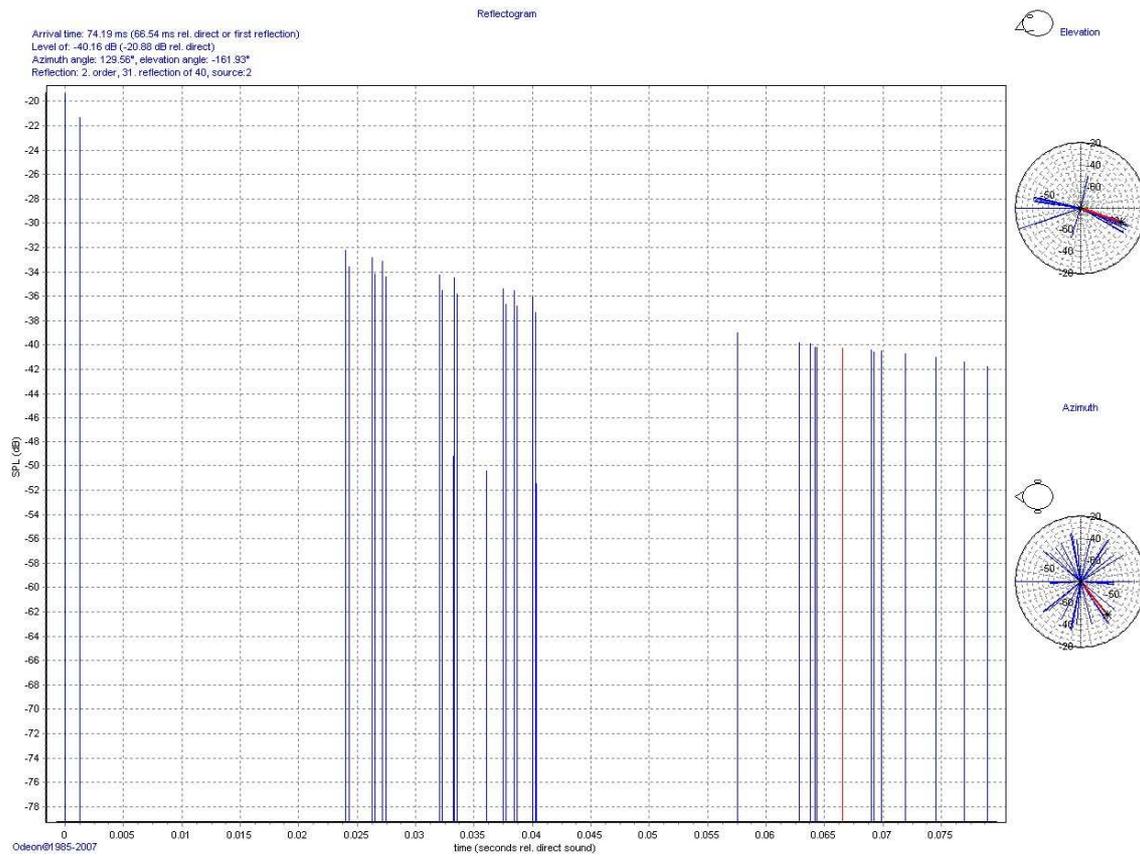
**Figura 2.30a: Reflettogramma:** In ascissa, il tempo di ritardo della riflessione rispetto al suono diretto in s; in ordinata il livello corrispondente in dB. La riflessione arriva dopo 33 ms, ossia con 26,25 ms di ritardo rispetto al suono diretto. La differenza di percorso è pari a circa 9 m



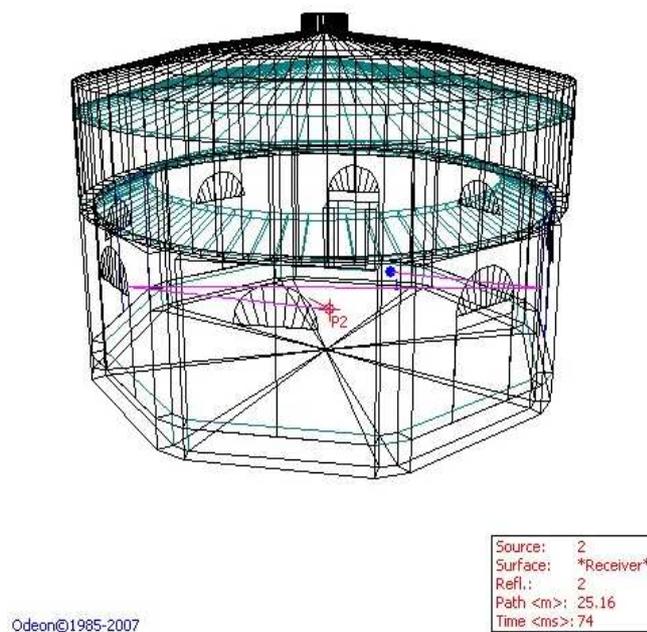
Odeon©1985-2007

Source:	2
Surface:	*Receiver*
Refl.:	1
Path <m>:	11.50
Time <ms>:	34

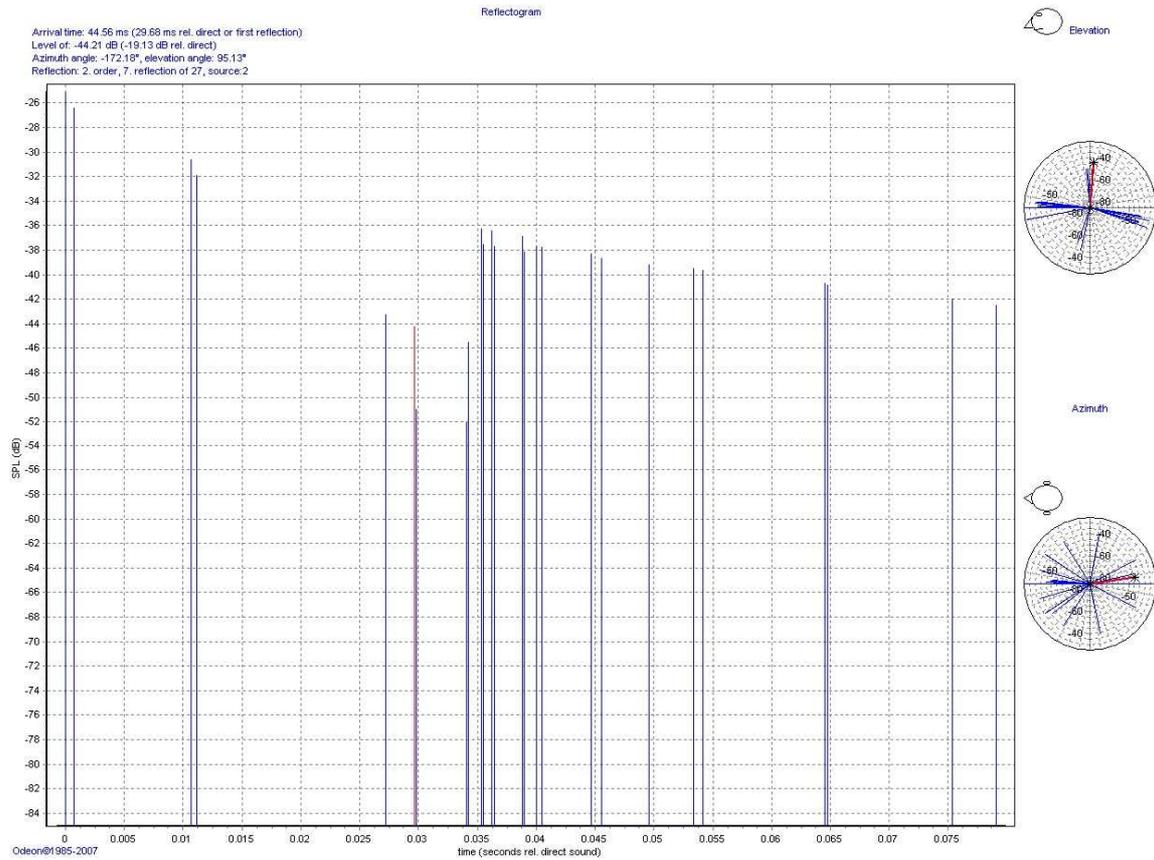
**Figura 2.30b:** La riflessione, relativa al reflottogramma di fig.2.30a, ha subito una riflessione alla parete e ha percorso 11,50 m.



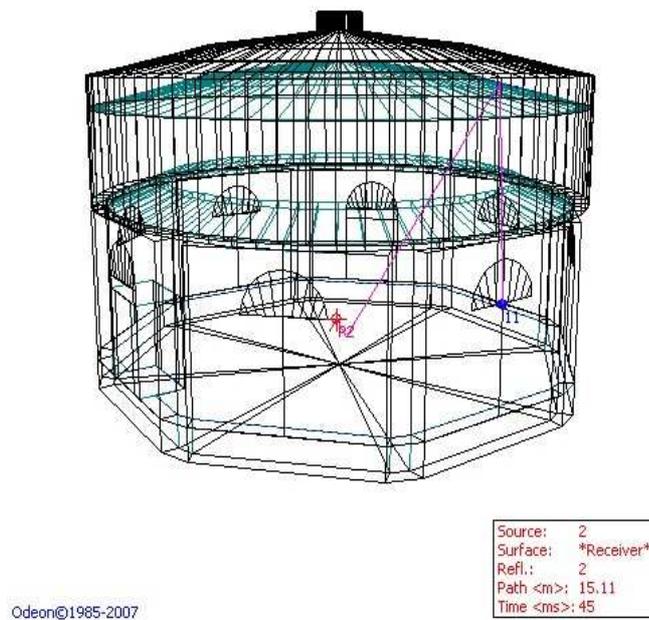
**Figura 2.31a: Reflettogramma:** In ascissa, il tempo di ritardo della riflessione rispetto al suono diretto in s; in ordinata il livello corrispondente in dB. La riflessione arriva dopo 74,19 ms, ossia con 66,54 ms di ritardo rispetto al suono diretto. La differenza di percorso è pari a circa 22 m.



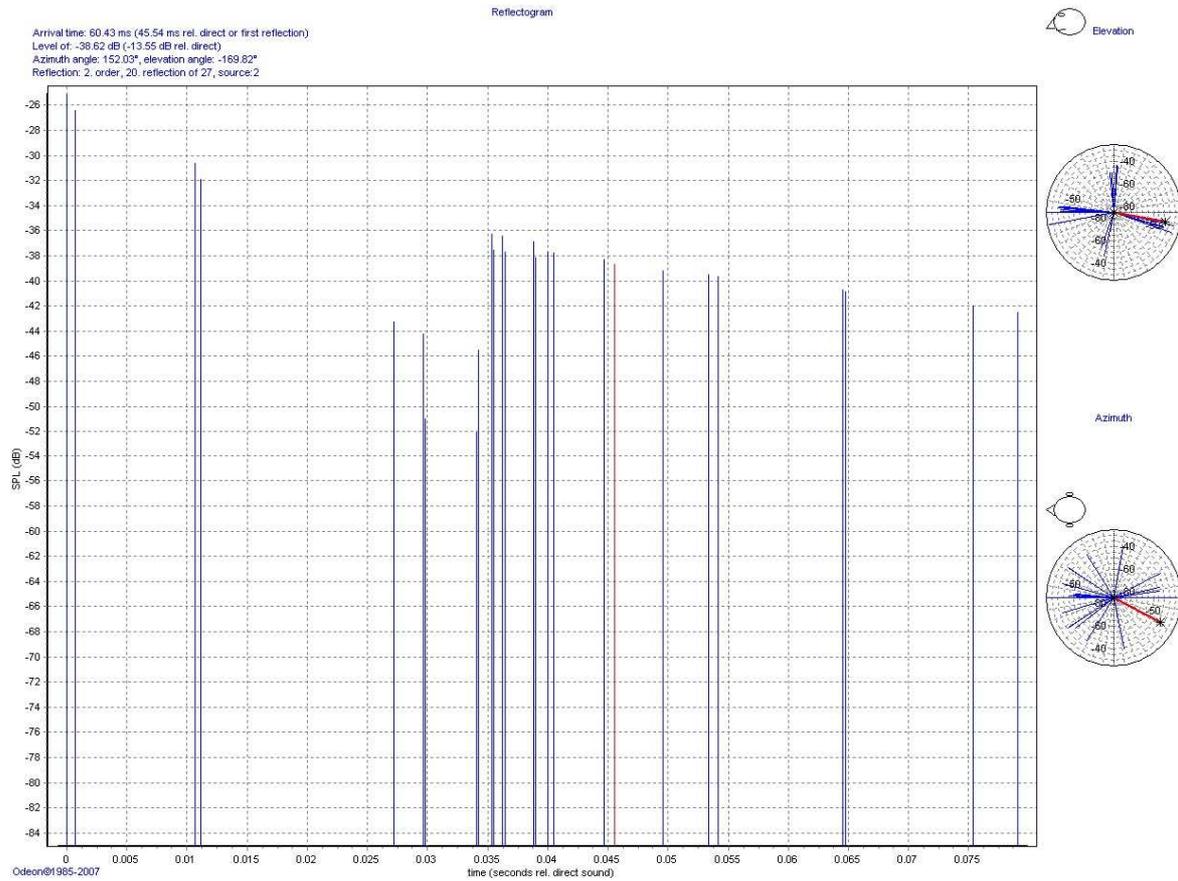
**Figura 2.31b: La riflessione, relativa al reflottogramma di fig.2.31a, ha subito 2 riflessioni prima di arrivare al ricevitore e ha percorso circa 25 m.**



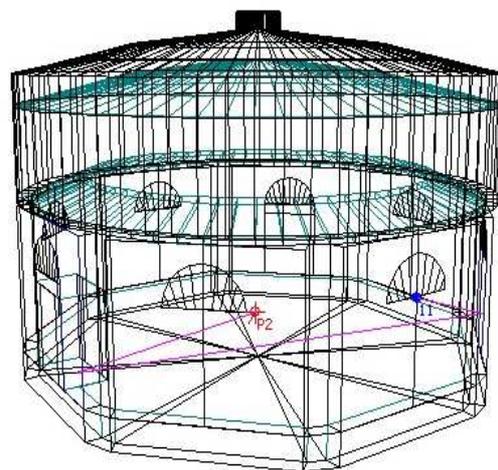
**Figura 2.32a: Reflettogramma:**In ascissa, il tempo di ritardo della riflessione rispetto al suono diretto in s ; in ordinata il livello corrispondente in dB. La riflessione arriva dopo 44,55 ms, ossia con 29,68 ms di ritardo rispetto al suono diretto. La differenza di percorso è pari a circa 10 m..



**Figura 2.32b: La riflessione** relativa al reflottogramma di fig.2.32a ha subito 2 riflessioni prima di arrivare al ricevitore e ha percorso circa 15 m.



**Figura 2.33a: Reflettogramma:**In ascissa, il tempo di ritardo della riflessione rispetto al suono diretto in s ; in ordinata il livello corrispondente in dB. La riflessione arriva dopo 60,43 ms, ossia con 45,54 ms di ritardo rispetto al suono diretto. La differenza di percorso è pari a circa 15 m.



Source: 2  
 Surface: \*Receiver\*  
 Refl.: 2  
 Path <m>: 20.49  
 Time <ms>: 60

Odeon©1985-2007

**Figura 2.33b: La riflessione** relativa al refltogramma di fig.2.33a ha subito 2 riflessioni prima di arrivare al ricevitore e ha percorso circa 20 m.

## CAPITOLO 3

### “TORRE DELL’ACQUA”: STUDIO DEGLI INTERVENTI CORRETTIVI

#### 3.1. GIUDIZIO SULLO STATO DI FATTO E DEFINIZIONE DEGLI OBIETTIVI.

Una volta realizzato un modello affidabile e quindi riprodotto in maniera fedele l’ambiente esaminato è possibile passare alla fase successiva: definire i possibili interventi di correzione da poter realizzare all’interno della torre.

Si riprendano in considerazione l’indice di chiarezza  $C_{80}$  (tabella 3.1), il tempo di primo decadimento (tabella 3.2) e l’indice STI (tabella 3.3) misurati durante la verifica dello stato di fatto.

Ricevitori	M1	M3	M4	M5	M6	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17
Frequenza	C80														
Hz	dB														
125	-3,66	-1,5	-2,08	-3,95	-0,1	0	1,21	-0,41	-2,71	-1,11	-1,32	0,19	-0,47	0,36	0,09
250	-2,18	-1,91	-1	-3,09	0,34	-1,11	-0,79	-2,06	-0,99	0,16	-2,14	-1,47	-0,87	0,41	-0,1
500	-4,34	-4,29	-5,63	-3,76	-4	-4,61	-5,43	-3,07	-3,73	-3,45	-3,21	-3,87	-3,87	-2,64	-2,41
1000	-6,19	-4,1	-3,9	-6	-2,84	-3,17	-6,07	-5,3	-3,09	-2,85	-3,43	-5,83	-5,87	-1,15	-7,14
2000	-5,07	-1,32	-2,05	-4,53	-4,71	-3,22	-6,47	-4,73	-4,93	-4,79	-3,56	-5,01	-5,13	-0,29	-4,74

**Tabella 3.1: Valori dello stato di fatto dell’indice di chiarezza  $C_{80}$  alle diverse frequenza per la sorgente S7 e per i diversi ricevitori.**

Ricevitori	M1	M3	M4	M5	M6	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17
Frequenza	EDT	EDT	EDT	ED T	EDT	ED T	ED T								
Hz	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s
125	3,5	3,8	2,99	2,56	4,75	4,22	2,2	3,4	4,28	3,81	2,72	2,94	3,26	1,92	3,46
250	3,14	4,6	2,9	2,63	4	3,72	2,52	3,31	3,31	4,86	3,04	3,11	3,32	2,17	3,68
500	4,13	5,5	3,97	3,58	5,96	5,55	3,79	4	3,87	6,2	4,05	4,09	3,85	2,98	3,44
1000	3,88	4,53	4,39	4,12	5,32	4,88	4	4,35	4,6	4,73	4,66	4,16	4,26	3,26	4,1
2000	3,31	4	3,76	3,8	3,95	3,77	3,55	3,57	3,67	3,89	3,88	3,6	3,61	2,48	3,62

**Tabella 3.2: Valori dello stato di fatto dell’indice del tempo di primo decadimento EDT alle diverse frequenze per la sorgente S7 e per i diversi ricevitori**

<b>M3</b>	<b>M4</b>	<b>M6</b>	<b>M7</b>	<b>M8</b>	<b>M9</b>	<b>M12</b>	<b>M13</b>	<b>M14</b>	<b>M16</b>	<b>M17</b>
<b>STI</b>										
0,47	0,46	0,41	0,39	0,4	0,42	0,44	0,43	0,47	0,49	0,46

**Tabella 3.3: Valori dello stato di fatto dell'indice STI per i diversi ricevitori.**

I valori ottenuti, confrontati con i valori suggeriti dalla norma ISO 3382 (tabella 3.4, 3.5), denunciano una scarsa chiarezza, un tempo di primo decadimento elevato e uno scarso indice STI.

<b>Aspetti soggettivi</b>	<b>Descrittori</b>	<b>Frequenze (Hz)</b>	<b>JND</b>	<b>Valori tipici</b>
<b>Chiarezza percepita</b>	Clarity, $C_{80}$ , in dB	500-1000	1 dB	-5 dB; +5 dB
<b>Riverberazione percepita</b>	Early Decay Time, EDT, in s	500-1000	Rel.5%	1.0 s; 3.0 s

**Tabella 3.4: Descrittori degli aspetti soggettivi secondo la ISO 3382.**

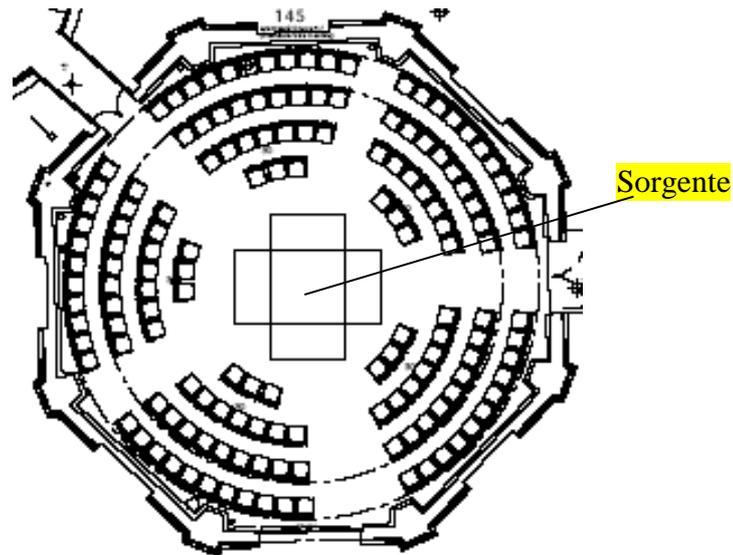
<b>Intelligibilità</b>	<b>Nulla</b>	<b>Cattiva</b>	<b>Scarsa</b>	<b>Accettabile</b>	<b>Buona</b>	<b>Eccellente</b>
<b>STI</b>	0	<0.30	0.30-0.45	0.45-0.60	0.60-0.75	>0.75

**Tabella 3.5: Valori assunti dall'indice STI.**

A titolo semplificativo si propongono in questo capitolo una serie di interventi correttivi riferiti ad una delle disposizioni d'uso indicate nel progetto fornito dal Comune di Budrio. La sorgente, in questa configurazione, può essere rappresentata da un attore o da una piccola formazione musicale, amplificata o meno. Il pubblico è diviso in cinque blocchi simmetrici rispetto al centro della stanza. Si riporta in figura 3.6 uno schema in pianta. Il progetto prevede un pavimento in parquet e non fornisce specifiche sui materiali per le coperture e sulle sorgenti.

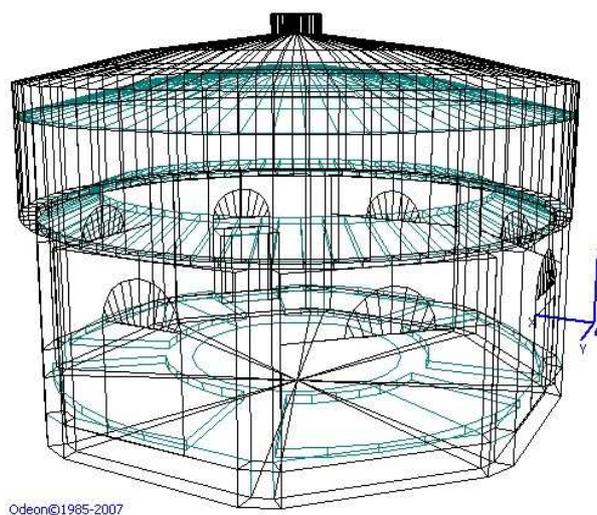
E' stato realizzato un modello tridimensionale della sala partendo dal disegno CAD in pianta ed successivamente inserito nel software di simulazione, Odeon 9.0 (figura 3.2).

La platea è stata schematizzata con cinque superfici equivalenti di materiale assorbente equidistanti di sezione pari a circa  $10 \text{ m}^2$  e alzata di 0.2 m. Al centro è posto un tappeto di forma circolare. Alle porte e al finestrone sono stati aggiunti delle tende in velluto.



**Figura 3.1: Possibile configurazione della sala in pianta 2D. La sorgente è collocata al centro circondata dalla platea.**

Una prima simulazione con questa configurazione fornisce miglioramenti sostanziali rispetto ai valori misurati (riferiti ad un ambiente vuoto e completamente riflettente). La simulazione con la sola configurazione di parquet, platea e tendaggi non raggiunge però gli obiettivi minimi richiesti dalla ISO 3382. Sarà quindi necessario intervenire sui coefficienti di assorbimento delle pareti laterali non interessate da aperture (par. 3.2, 3.3) e realizzare strutture che controllino e focalizzino le prime riflessioni (par. 3.4).



**Figura 3.2: 3D VIEW del modello dell' ambiente realizzato in Odeon.**

### 3.2 PRIMO INTERVENTO

Il primo intervento proposto, in linea con molte realizzazioni commerciali, prevede l'uso intensivo di pannelli perforati.

#### 3.2.1 RICHIAMI TEORICI SUL PANNELLO PERFORATO

I pannelli perforati sono montati ad una certa distanza da una superficie rigida (vedi Fig.3.3); i fori nel pannello agiscono come una serie di “colli” che dividono la stessa “camera”. L'aria contenuta in queste aperture, analogamente al risuonatore di Helmholtz, si comporta come una serie di masse connesse ad un'unica molla (l'aria compresa nello spazio tra il pannello perforato e la superficie rigida posteriore), vi sarà dunque una frequenza di risonanza alla quale l'assorbimento dell'onda sonora è massimo. Come per il risuonatore singolo, è possibile prevedere la frequenza di risonanza di detta struttura mediante la formula empirica: singolo, è possibile prevedere la frequenza di risonanza di detta struttura mediante la formula empirica:

$$f_0 = (c / 2\pi) \sqrt{P / dl'} \quad (\text{Hz}) \quad (3.1)$$

dove:

c = velocità del suono in aria, in  $\frac{m}{s}$

P = rapporto di perforazione =  $\left[ \frac{\text{area globale dei fori}}{\text{area dell'intero pannello}} \right]$

d = distanza del pannello dalla parete rigida, in m

l' = lunghezza efficace del collo =  $\left( l + \frac{\pi \cdot r}{2} \right)$ , in m

r = raggio dei fori, in m.

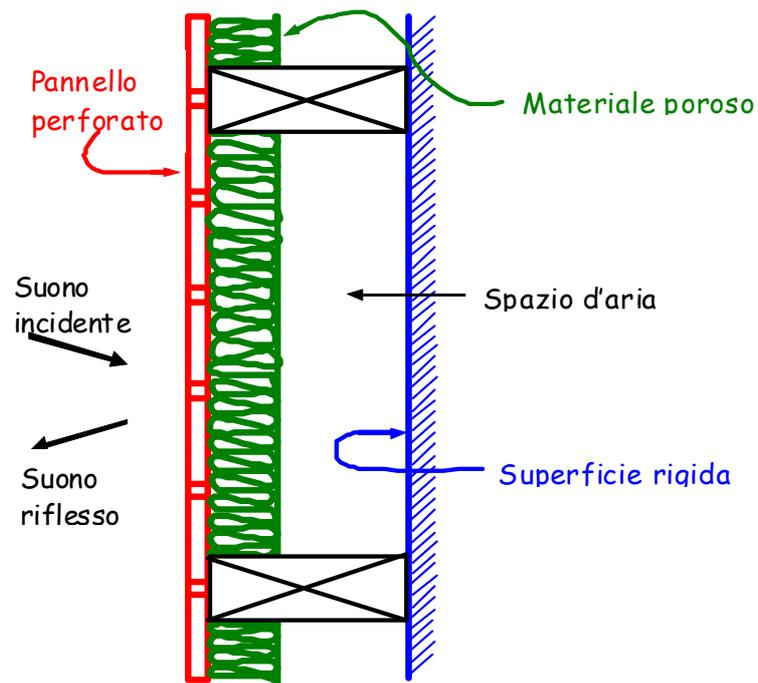


Figura 3.3: Struttura di un sistema di isolamento a pannelli perforati assorbenti.

Se è richiesto di allargare la risposta di questo tipo di risonatore, si può porre un materiale poroso nella cavità risonante, il cui effetto è quello di rallentare per attrito il movimento dell'aria all'interno della cavità stessa, questo aumenterà lo spettro di assorbimento, ma contemporaneamente ridurrà l'efficacia del risonatore alla frequenza di risonanza (ovvero l'altezza del picco di assorbimento). Volendo ottenere un assorbimento più regolarmente distribuito su una banda di frequenze più ampia, occorre praticare dei fori di diverso diametro, ovvero spaziarli in maniera non uniforme in modo da variare il volume della cavità. Quest'ultimo effetto può anche essere ottenuto mantenendo inalterata la foratura e variando lo spazio vuoto dietro il pannello.

### 3.2.2 COSTRUZIONE DEL MODELLO

Riprendendo il modello definito precedentemente in Odeon 9.0 (figura 3.2), è stata collocata la sorgente omnidirezionale in posizione centrale e sono state fornite le coordinate dei ricevitori (le stesse assegnate per la taratura).

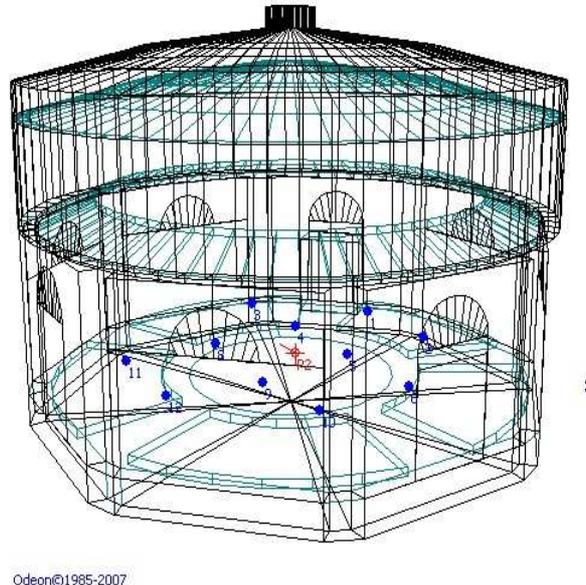


Figura 3.4: 3D VIEW con sorgente centrale (in rosso) e ricevitori (in azzurro).

In seguito sono stati assegnati ad ogni componente della sala i rispettivi coefficienti di assorbimento alle diverse frequenze (figura 3.6). Alle pareti, ad eccezione di quelle dotate di porta e finestrone, è stato fissato un pannello assorbente perforato con le caratteristiche acustiche di un componente in commercio (Topakustik Typ 16/16/10-2, 200 mm di spessore).

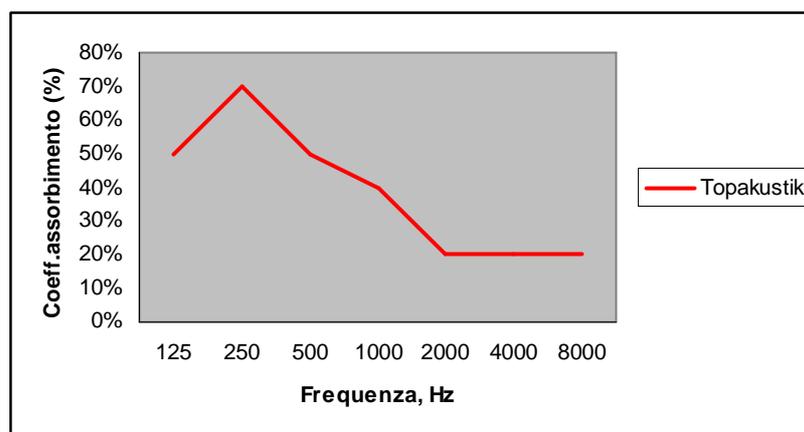
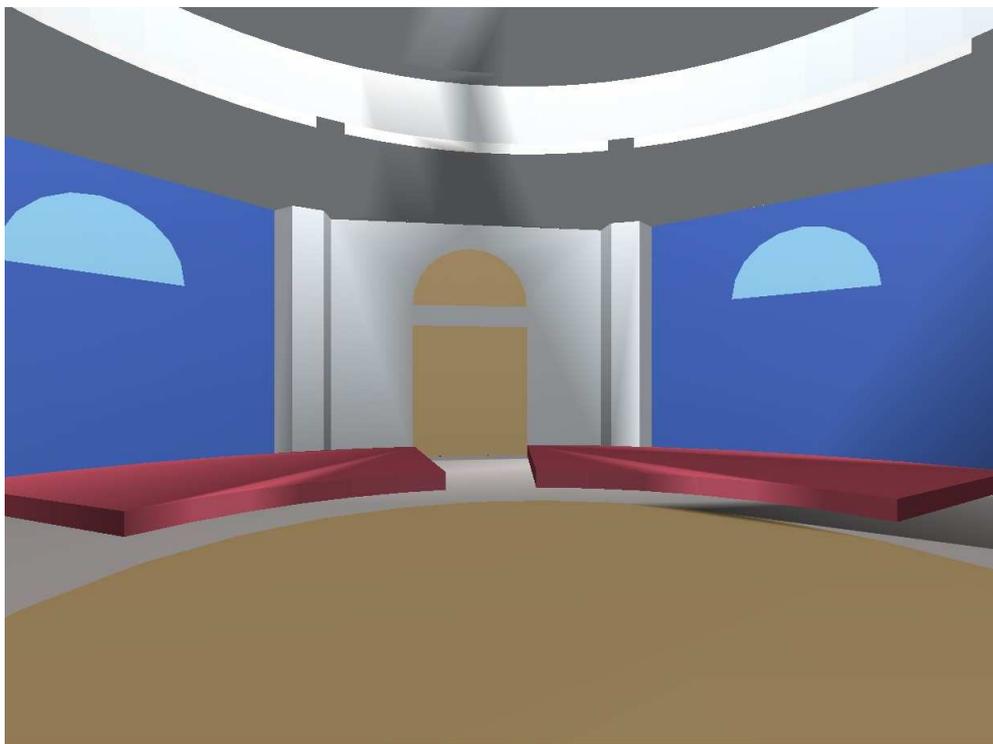


Figura 3.5: Andamento del coefficiente di assorbimento del pannello perforato alle diverse frequenze.

		Frequenza, Hz	125	250	500	1000	2000
Materiali	Componenti	Area, m <sup>2</sup>					
Vetro	Finestre	22	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07
Tendaggio pesante	Porte, finestrone, tappeto	47	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24
Parquet	Pavimento	150	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06
Velluto	Platea	100	0,128	0,41	0,54	0,45	0,423
Topakustik	Pareti (no colonne)	93	0,50	0,70	0,50	0,40	0,20
Cemento	Restante parte	570	0,09	0,10	0,07	0,055	0,05

**Tabella 3.6: Valori dei coefficienti assegnati ai materiali a cui corrispondono rispettive componenti della sala (con le corrispondenti aree).**



Oden©1985-2007

**Figura 3.6: Rendering interno. Le pareti, ad eccezione di quelle dotate di finestrone e porte, sono state rivestite con Topakustik Typ 16/16/10-2.**

### 3.2.3 SIMULAZIONE

I risultati ottenuti dalla simulazione mostrano chiaramente dei netti miglioramenti rispetto allo stato di fatto e raggiungono gli obiettivi qualitativi indicati dalla ISO 3382 per il tempo di primo decadimento (tabella 3.7), la chiarezza (tabella 3.8) e l'intelligibilità del parlato (tabella 3.9).

Ricevitori	M3	M4	M6	M8	M9	M12	M13	M14	M16	M17
Frequenza	EDT									
Hz	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s
125	2,08	2,02	2,04	1,81	1,92	1,94	1,87	1,87	1,85	1,8
250	1,2	1,33	1,04	1,04	1,26	1,06	1,04	1	1,35	1,07
500	1,39	1,19	1,28	1,3	1,19	1,29	1,2	1,14	1,15	1,08
1000	1,39	1,46	1,31	1,45	1,5	1,37	1,25	1,38	1,48	1,31
2000	1,66	1,57	1,69	1,66	1,66	1,59	1,48	1,53	1,5	1,7

**Tabella 3.7: Valori dell'indice EDT ottenuti dalla simulazione relativi ai ricevitori considerati.**

Ricevitori	M3	M4	M6	M8	M9	M12	M13	M14	M16	M17
Frequenza	C80									
Hz	dB									
125	2	1,2	2,1	2,3	1	2,4	1,2	1,6	0,7	1,5
250	4,7	4,2	5,2	5	3,8	5	4,2	4,8	3,8	4,8
500	4,4	3,9	4,9	4,8	3,3	4,8	4	4,3	3,3	4,3
1000	3,8	3,1	4,1	4,1	2,5	4,2	3,1	3,4	2,5	3,3
2000	2,9	2	3,1	3,1	1,4	3,3	2,2	1,9	1,2	2

**Tabella 3.8: Valori dell'indice di chiarezza C80 ottenuti dalla simulazione relativi ai diversi ricevitori considerati.**

M3	M4	M6	M8	M9	M12	M13	M14	M16	M17
STI	STI	STI	STI	STI	STI	STI	STI	STI	STI
0,59	0,58	0,6	0,6	0,56	0,6	0,59	0,59	0,56	0,58

**Tabella 3.9: Valori dell'indice STI simulati relativi ai diversi ricevitori considerati.**

L'intervento, come si può vedere nel rendering, prevede la copertura dell'intera parete ad esclusione del semicerchio della finestra. Questo comporta una serie di difficoltà per realizzare le strutture di sostegno e il profilo del materiale. Il materiale utilizzato per la simulazione, inoltre, ha un costo piuttosto elevato (quantificabile in 2-300 eur al metro quadrato).

### 3.3 SECONDO INTERVENTO

Il secondo intervento proposto prevede l'utilizzo di pannelli vibranti trattati in superficie con materiale assorbente.

#### 3.3.1 RICHIAMI TEORICI PANNELLO VIBRANTE

Se un materiale ermetico, relativamente sottile, viene fissato ad una certa distanza da una superficie rigida, esso si comporterà come un sistema massa-molla e mostrerà risonanze caratteristiche (frequenze preferenziali di vibrazione). Quando un'onda sonora colpisce questi pannelli, tenderà a forzare il sistema in vibrazione; se la frequenza del suono incidente corrisponde ad una delle frequenze di risonanza del sistema, il trasferimento di energia che ha luogo è massimo. Poiché i pannelli sottili hanno un'inerzia e sono inoltre smorzati dal fissaggio alle estremità, parte dell'energia sonora che li investe viene convertita in energia meccanica e quindi "assorbita".

D'altra parte, essendo il pannello stesso posto in vibrazione, esso irradierà nuovamente energia nella stanza, la sua efficienza come materiale fonoassorbente è quindi limitata.

I pannelli assorbenti di uso comune tendono ad essere più efficaci alle basse frequenze, con un picco di assorbimento massimo alla frequenza di risonanza; in generale, all'aumentare della densità superficiale del pannello e/o della profondità dell'intercapedine d'aria tra pannello e superficie rigida, la frequenza di assorbimento massimo diminuisce, essa segue infatti la relazione:

$$f_0 = 60 / \sqrt{\sigma d} \quad (\text{Hz}) \quad (3.2)$$

dove:

$\sigma$  è la densità superficiale del materiale, espressa in  $\frac{Kg}{m^2}$  ;

$d$  è la profondità dell'intercapedine d'aria.

Se viene richiesto un allargamento dell'intervallo effettivo di frequenze assorbite, è necessario inserire nell'intercapedine d'aria un materiale assorbente poroso.

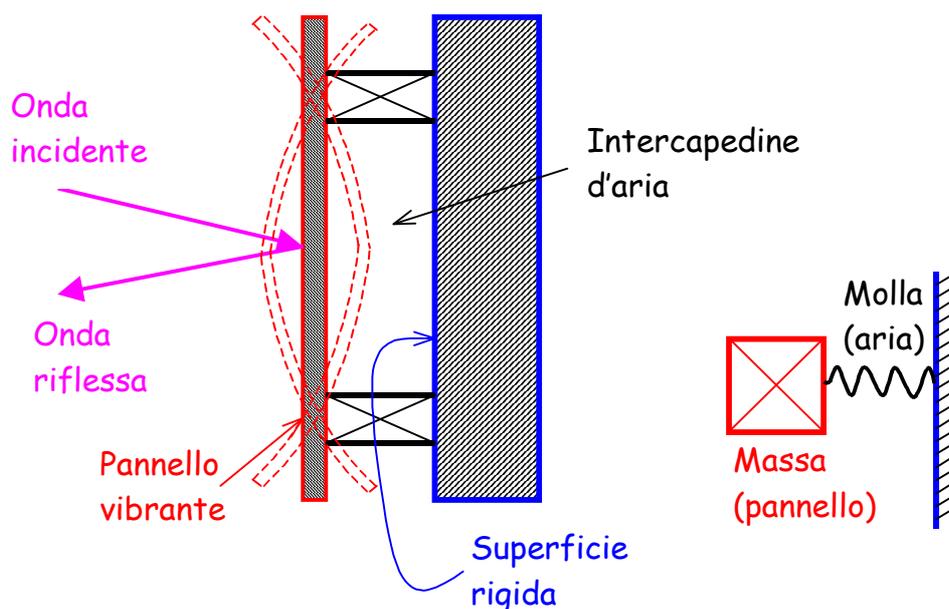


Figura 3.7: struttura di un pannello vibrante

### 3.3.2 COSTRUZIONE DEL MODELLO

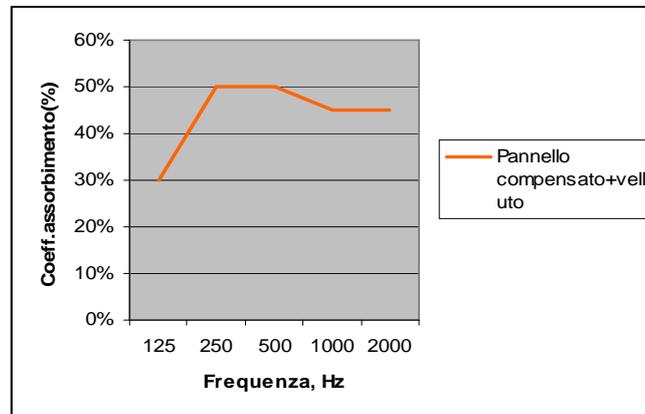
Il modello 3D utilizzato per la simulazione è lo stesso definito precedentemente (figura 3.2) dotato sempre di una sorgente centrale omnidirezionale e dello stesso numero di ricevitori già usati per la taratura.

Alle varie componenti sono stati associati gli stessi coefficienti di assorbimento del primo intervento fatta eccezione per le pareti. Infatti in corrispondenza di queste, ad eccezione di quelle dotate di porte e finestrone, è stato collocato a circa 5.7 mm di distanza un pannello di compensato di 60 cm di larghezza e 2.60 di altezza con fori di diametro 1.6 mm.

		Frequenza, Hz	125	250	500	1000	2000
Materiali	Componenti	Area, m <sup>2</sup>					
Vetro	Finestre	22	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07
Tendaggio pesante	Porte, finestrone,tappeto	47	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24
Parquet	Pavimento	150	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06
Velluto	Platea	100	0,128	0,41	0,54	0,45	0,423
Pannello+velluto	Pareti(no colonne)	60	0,30	0,50	0,50	0,45	0,45
Cemento	Restante parte	603	0,09	0,10	0,07	0,055	0,05

**Tabella 3.10: Valori dei coefficienti assegnati ai materiali a cui corrispondono rispettive componenti della sala.**

Poiché questo tipo di pannello tende ad essere maggiormente efficace alle basse frequenze è stato associato ad uno strato di velluto superficiale che, al contrario, presenta caratteristiche assorbenti alle medie e alte frequenze.



**Figura 3.8:** Andamento del coefficiente di assorbimento del pannello compensato con velluto superficiale alle diverse frequenze.



Odeon©1985-2007

**Figura 3.9:** Rendering interno. Le pareti, fatta eccezione per quelle dotate di porte e finestrone, sono state coperte con un pannello vibrante, rivestito di materiale assorbente, di 4.6 m circa di larghezza e 2.6 m di altezza.

## 3.3.3 SIMULAZIONE

I valori ottenuti confermano l'esito positivo dell'intervento. Rispetto al pannello perforato (che però copre un'area superiore) si hanno prestazioni inferiori ma comunque aderenti ai requisiti della ISO 3382. I valori dello STI risultano tutti inferiori al valore di 0.6 e quindi rendono necessario un intervento sulle prime riflessione (par.3.4).

Ricevitori	M3	M4	M6	M8	M9	M12	M13	M14	M16	M17
Frequenza	EDT									
Hz	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s
125	2,38	2,47	2,34	2,27	2,23	2,34	2,29	2,29	2,3	2,27
250	1,76	1,58	1,66	1,75	1,6	1,7	1,74	1,68	1,55	1,52
500	1,51	1,6	1,4	1,5	1,64	1,42	1,64	1,56	1,62	1,37
1000	1,56	1,72	1,56	1,57	1,57	1,53	1,79	1,69	1,67	1,66
2000	1,51	1,44	1,44	1,46	1,51	1,42	1,61	1,5	1,65	1,47

**Tabella 3.11: Valori dell'indice EDT simulati relativi ai ricevitori considerati.**

Ricevitori	M3	M4	M6	M8	M9	M12	M13	M14	M16	M17
Frequenza	C80	C80	C80	C80	C80	C80	C80	C80	C80	C80
Hz	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB
125	0,9	-0,1	0,6	0,8	-0,3	0,9	-0,4	0,5	-0,8	-0,4
250	2,3	1,8	2,3	2,3	1,3	2,4	1,5	2,3	1,1	1,7
500	3,2	2,6	3	3,1	2	3,2	2,2	2,9	1,7	2,4
1000	2,8	2,1	2,6	2,7	1,5	2,9	1,7	2,3	1,1	1,7
2000	3,3	2,5	3,1	3,2	1,9	3,3	2,2	2,6	1,5	2

**Tabella 3.12: Valori dell'indice di chiarezza C80 simulati relativi ai ricevitori considerati.**

M3	M4	M6	M8	M9	M12	M13	M14	M16	M17
STI									
0,58	0,57	0,57	0,58	0,54	0,58	0,56	0,57	0,53	0,56

**Tabella 3.13: Valori dell'indice STI simulati relativi ai ricevitori considerati.**

### 3.4 ULTERIORI INTERVENTI

Riassumendo le simulazioni fin qui effettuate sono riportate le seguenti tabelle relative all'indice di chiarezza medio e del tempo di primo decadimento a 500 e 1000 Hz e all'indice STI.

	<b>C80 MEDIO</b>		
<b>Frequenza, Hz</b>	<b>Sperimentale</b>	<b>Pannello perforato</b>	<b>Pannello vibrante+velluto</b>
<b>500</b>	-3,88	4,2	3
<b>1000</b>	-4,46	3,41	2,43

**Tabella 3.14: Confronto tra i valori nello stato di fatto iniziale dell'indice di chiarezza e i valori ottenuti con i due interventi**

	<b>EDT MEDIO</b>		
<b>Frequenza, Hz</b>	<b>Sperimentale</b>	<b>Pannello preforato</b>	<b>Pannello vibrante+velluto</b>
<b>500</b>	4,33	1,22	1,52
<b>1000</b>	4,34	1,39	1,63

**Tabella 3.15: Confronto tra i valori misurati nello stato di fatto iniziale dell'indice EDT e i valori ottenuti con i due interventi.**

<b>M3</b>	<b>M4</b>	<b>M6</b>	<b>M7</b>	<b>M8</b>	<b>M9</b>	<b>M12</b>	<b>M13</b>	<b>M14</b>	<b>M16</b>	<b>M17</b>
<b>STI</b>										
0,47	0,46	0,41	0,39	0,4	0,42	0,44	0,43	0,47	0,49	0,46

**Tabella 3.16: Valori dell'indice STI nello stato di fatto iniziale.**

<b>M3</b>	<b>M4</b>	<b>M6</b>	<b>M8</b>	<b>M9</b>	<b>M12</b>	<b>M13</b>	<b>M14</b>	<b>M16</b>	<b>M17</b>
<b>STI</b>									
0,59	0,58	0,6	0,6	0,56	0,6	0,59	0,59	0,56	0,58

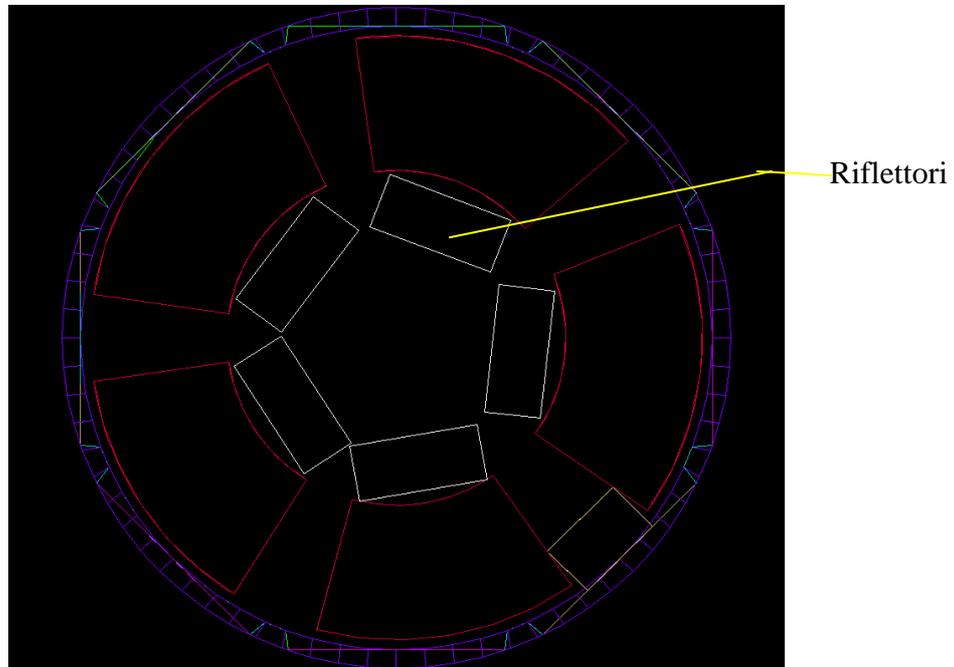
**Tabella 3.17: Valori dell'indice STI ricavati dal primo intervento.**

<b>M3</b>	<b>M4</b>	<b>M6</b>	<b>M8</b>	<b>M9</b>	<b>M12</b>	<b>M13</b>	<b>M14</b>	<b>M16</b>	<b>M17</b>
<b>STI</b>									
0,58	0,57	0,57	0,58	0,54	0,58	0,56	0,57	0,53	0,56

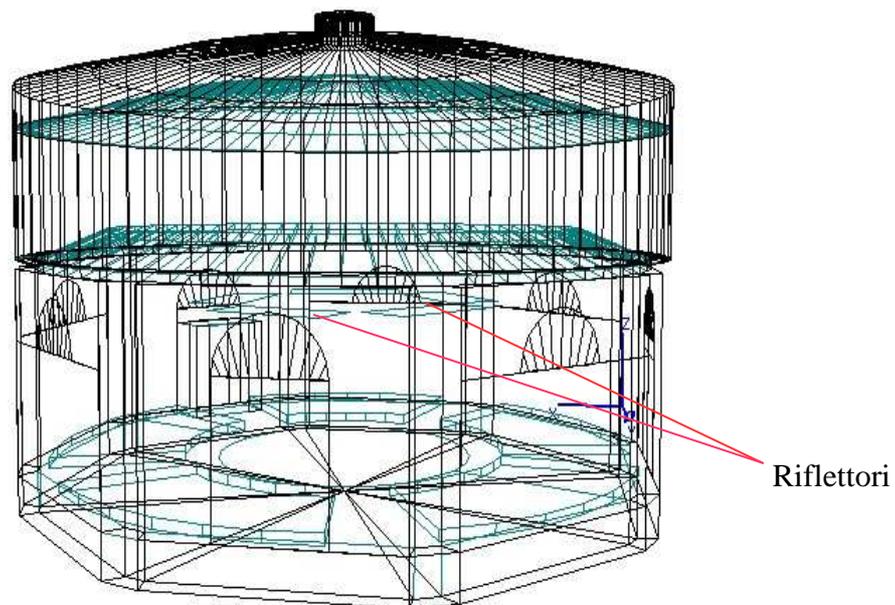
**Tabella 3.18: Valori dell'indice STI ricavati dal secondo intervento.**

Per migliorare l'indice STI del secondo intervento (pannello vibrante) sono stati inseriti nel modello cinque riflettori centrali in plexiglass.

Ogni riflettore, di dimensioni 2.75m\*1.20m, è posto a circa 3 m di altezza.



**Figura 3.10: Vista in pianta della sala con i cinque riflettori.**



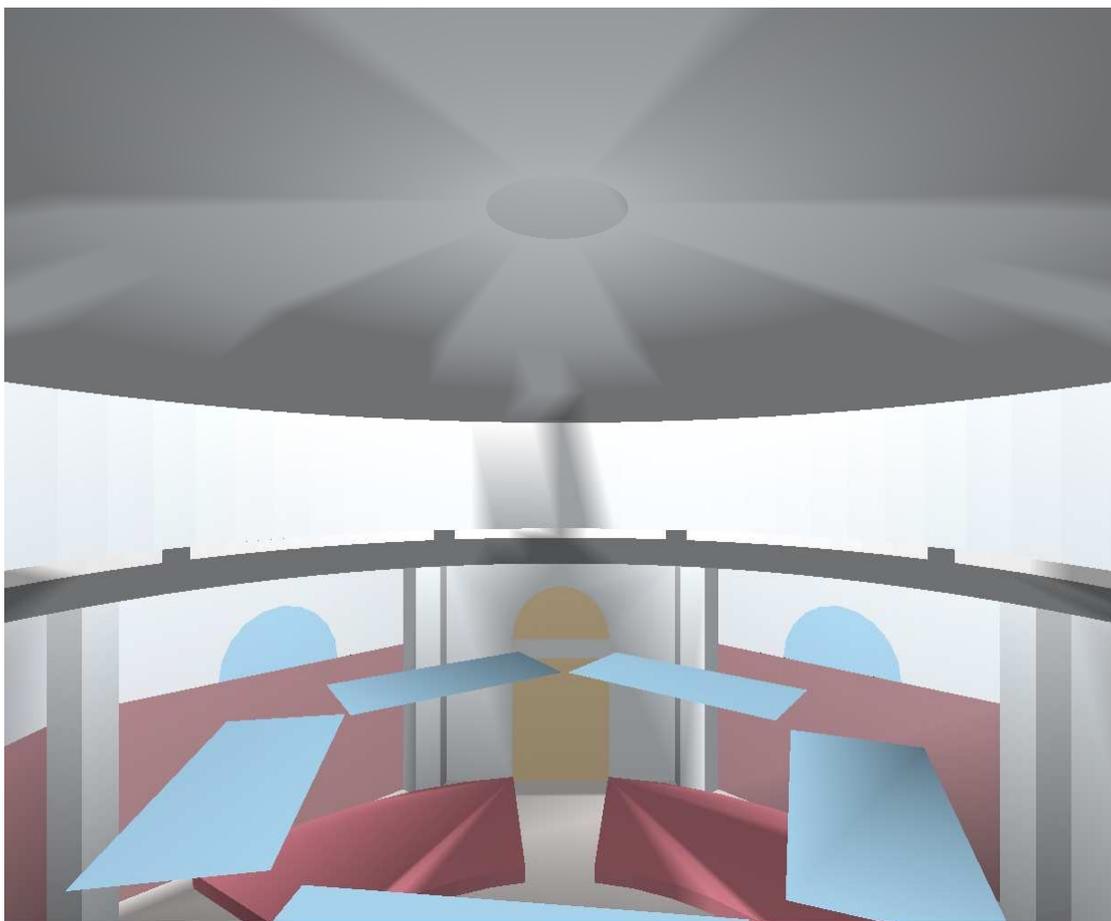
Odeon©1985-2007

**Figura 3.11: 3D VIEW. I cinque riflettori centrali sono stati collocati a 3 m di altezza.**

Il modello utilizzato per la simulazione è lo stesso definito precedentemente nel secondo intervento.

		Frequenza, Hz	125	250	500	1000	2000
Materiali	Componenti	Area, m <sup>2</sup>					
Vetro	Finestre, riflettori plexiglass	38,5	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07
Tendaggio pesante	Porte, finestrone,tappeto	47	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24
Parquet	Pavimento	150	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06
Velluto	Platea	100	0,128	0,41	0,54	0,45	0,423
Pannello+velluto	Pareti(no colonne)	60	0,30	0,50	0,50	0,45	0,45
Cemento	Restante parte	603	0,09	0,10	0,07	0,055	0,05

**Tabella 3.19: Valori dei coefficienti assegnati ai materiali a cui corrispondono rispettive componenti della sala.**



Odeon©1985-2007

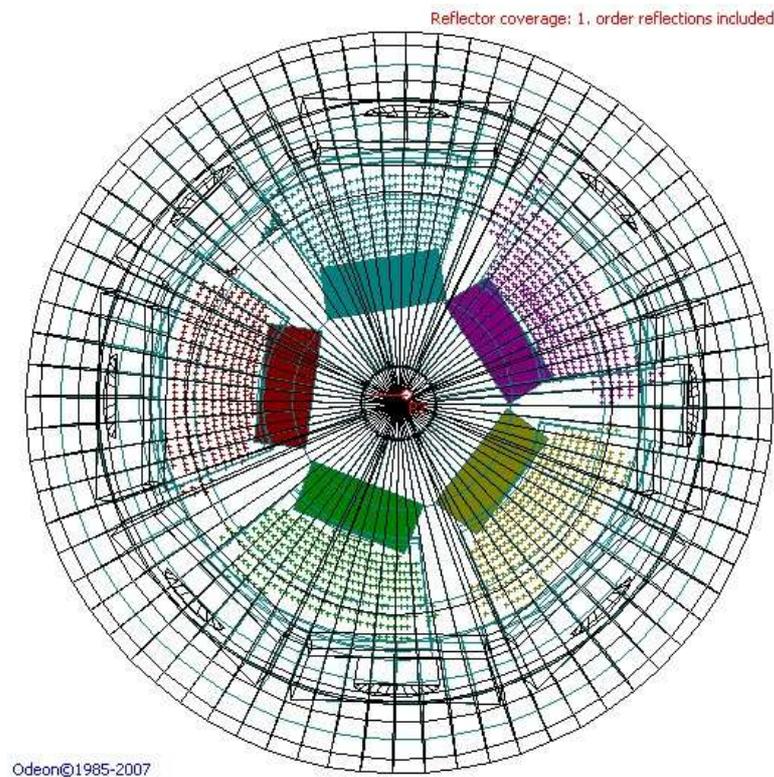
**Figura 3.12: Rendering interno. Cinque pareti sono state coperte con pannello vibrante fino a 2.60 m di altezza. I riflettori sono stati messi a circa 3m di altezza.**

I riflettori permettono di raggiungere valori ottimali dell'indice STI.

M3	M4	M6	M8	M9	M12	M13	M14	M16	M17
STI	STI	STI							
0,61	0,62	0,61	0,61	0,57	0,61	0,61	0,62	0,6	0,61

**Tabella 3.20: Valori dell'indice STI simulati ottenuti dopo l'aggiunta dei cinque riflettori.**

Si è verificato inoltre l'orientamento dei riflettori, verificando la copertura geometrica dell'area di platea all'altezza di 1.20 m, cioè l'altezza di un ascoltatore medio seduto. Considerata una sorgente centrale ad un'altezza di 70 cm le prime riflessioni coprono tutta l'area della platea (fig. 3.33).



**Figura 3.13: Coverage dall'alto. I cinque riflettori, rappresentati con cinque colori diversi, indirizzano perfettamente le riflessioni verso la platea.**

### 3.4.1 SIMULAZIONE

La configurazione pannello vibrante + riflettori, dati i buoni valori raggiunti dall'indice di chiarezza, dal tempo di primo decadimento e dall'STI, presenta un buon equilibrio tra risultati, costi, flessibilità d'uso e installazione. Si presentano quindi in dettaglio i risultati della simulazione e si tabulano i valori numerici con riferimento ai valori della misura dello stato di fatto iniziale.

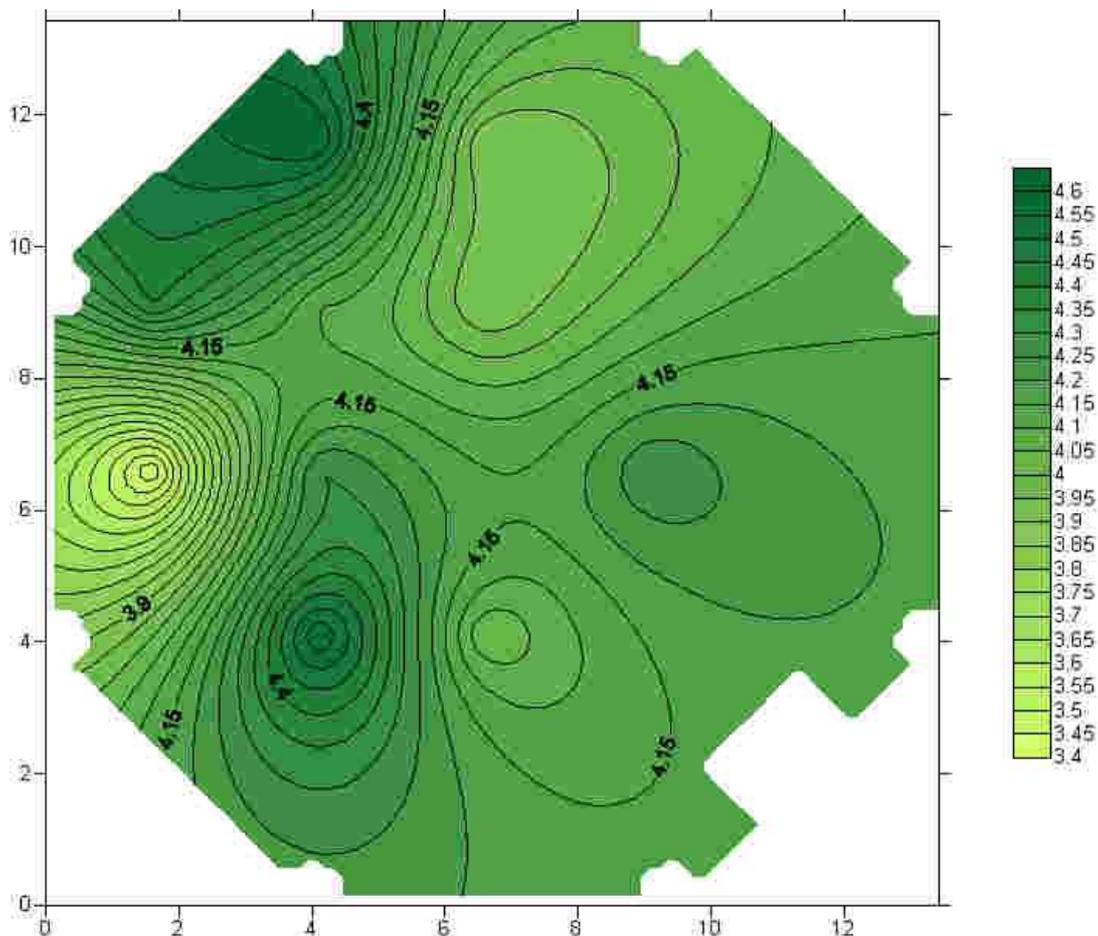


Figura 3.14: Mappa dell'indice di chiarezza  $C_{80}$  simulato a 250 Hz.

M3	M4	M6	M8	M9	M12	M13	M14	M16	M17
C80	C80	C80	C80	C80	C80	C80	C80	C80	C80
dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB
-1,91	-1	0,34	-1,11	-0,79	0,16	-2,14	-1,47	0,41	-0,1
4	4,6	4,3	4,3	3,4	3,9	4,1	4,4	3,9	4,6

Tabella 3.21: Confronto tra l'indice di chiarezza nello stato di fatto iniziale, in grigio, e simulato, in rosso, a 250 Hz relativi ai diversi ricevitori.

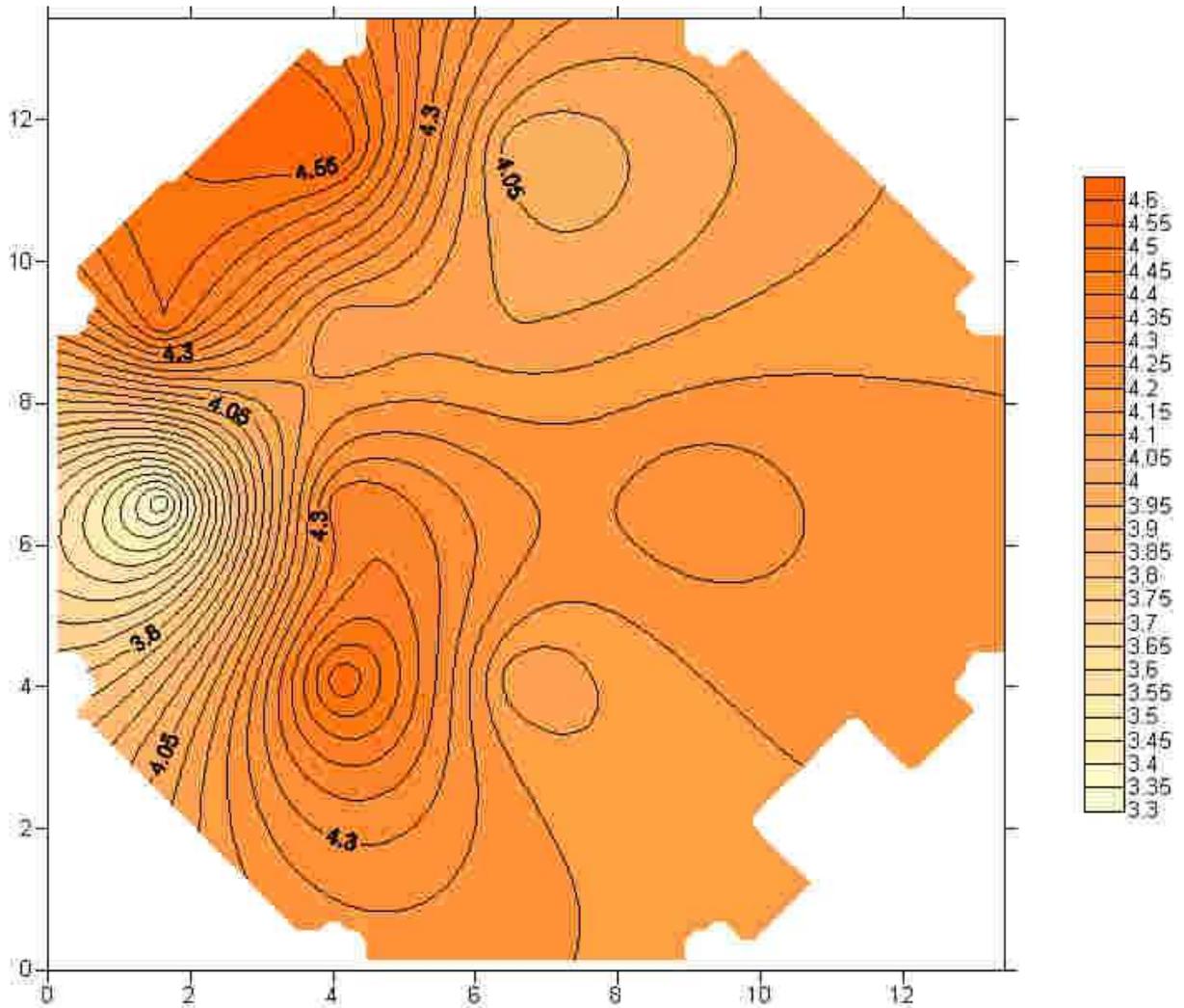


Figura 3.15: Mappa dell'indice di chiarezza  $C_{80}$  simulato a 500 Hz.

M3	M4	M6	M8	M9	M12	M13	M14	M16	M17
C80	C80	C80	C80	C80	C80	C80	C80	C80	C80
dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB
-4,29	-5,63	-4	-4,61	-5,43	-3,45	-3,21	-3,87	-2,64	-2,41
4,1	4,6	4,3	4,4	3,3	4,1	4,1	4,5	4	4,6

Tabella 3.22: Confronto tra l'indice di chiarezza nello stato di fatto iniziale, in grigio, e simulato, in rosso, a 500 Hz relativi ai diversi ricevitori.

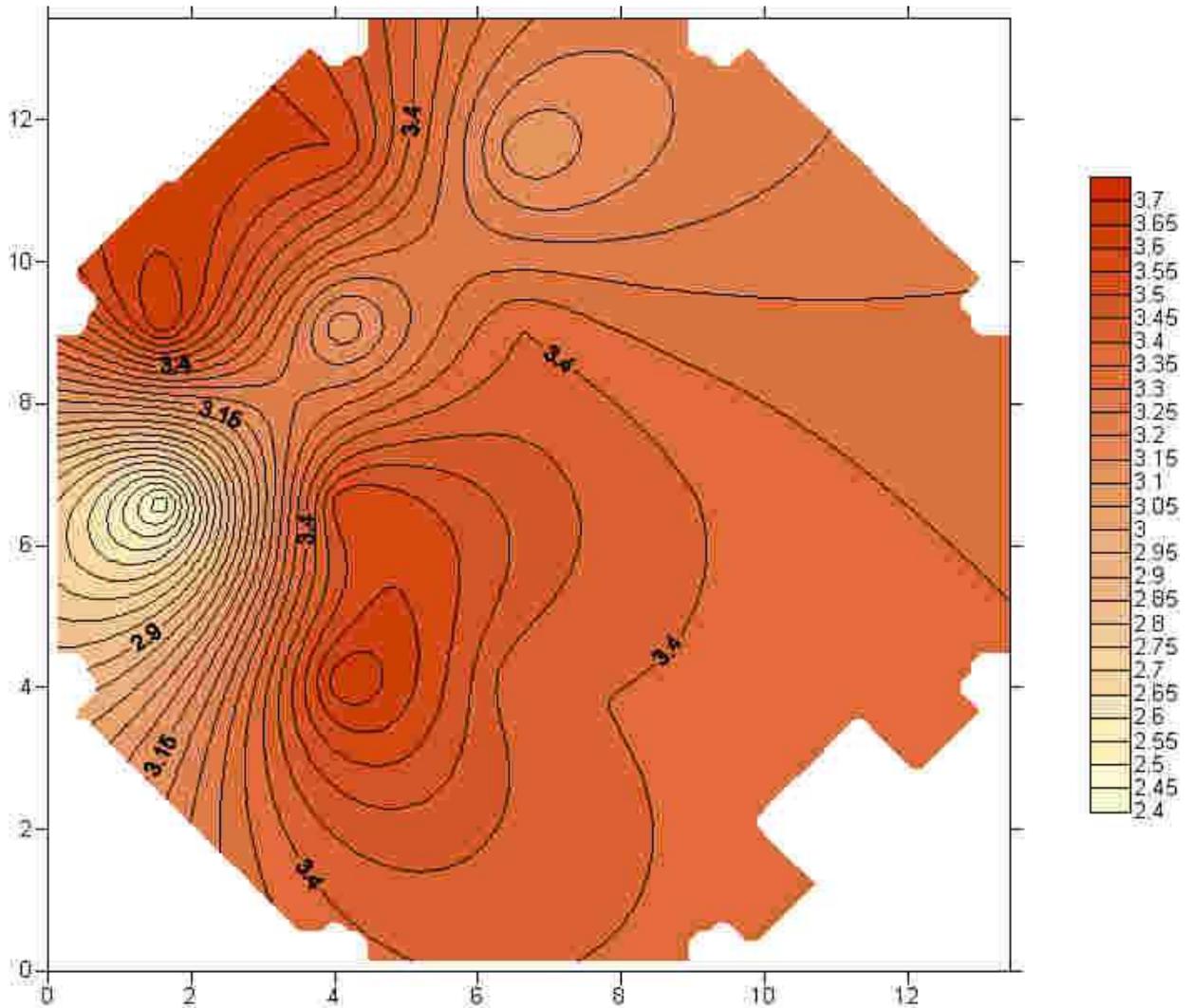


Figura 3.16: Mappa dell'indice di chiarezza  $C_{80}$  simulato a 1000 Hz.

M3	M4	M6	M8	M9	M12	M13	M14	M16	M17
C80	C80	C80	C80	C80	C80	C80	C80	C80	C80
dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB
-4,1	-3,9	-2,84	-3,17	-6,07	-2,85	-3,43	-5,83	-1,15	-7,14
3,4	3,7	3,4	3,6	2,4	3,4	3,1	3,7	3,1	3,6

Tabella 3.23: Confronto tra l'indice di chiarezza nello stato di fatto iniziale, in grigio, e simulato, in rosso, a 1000 Hz relativi ai diversi ricevitori.

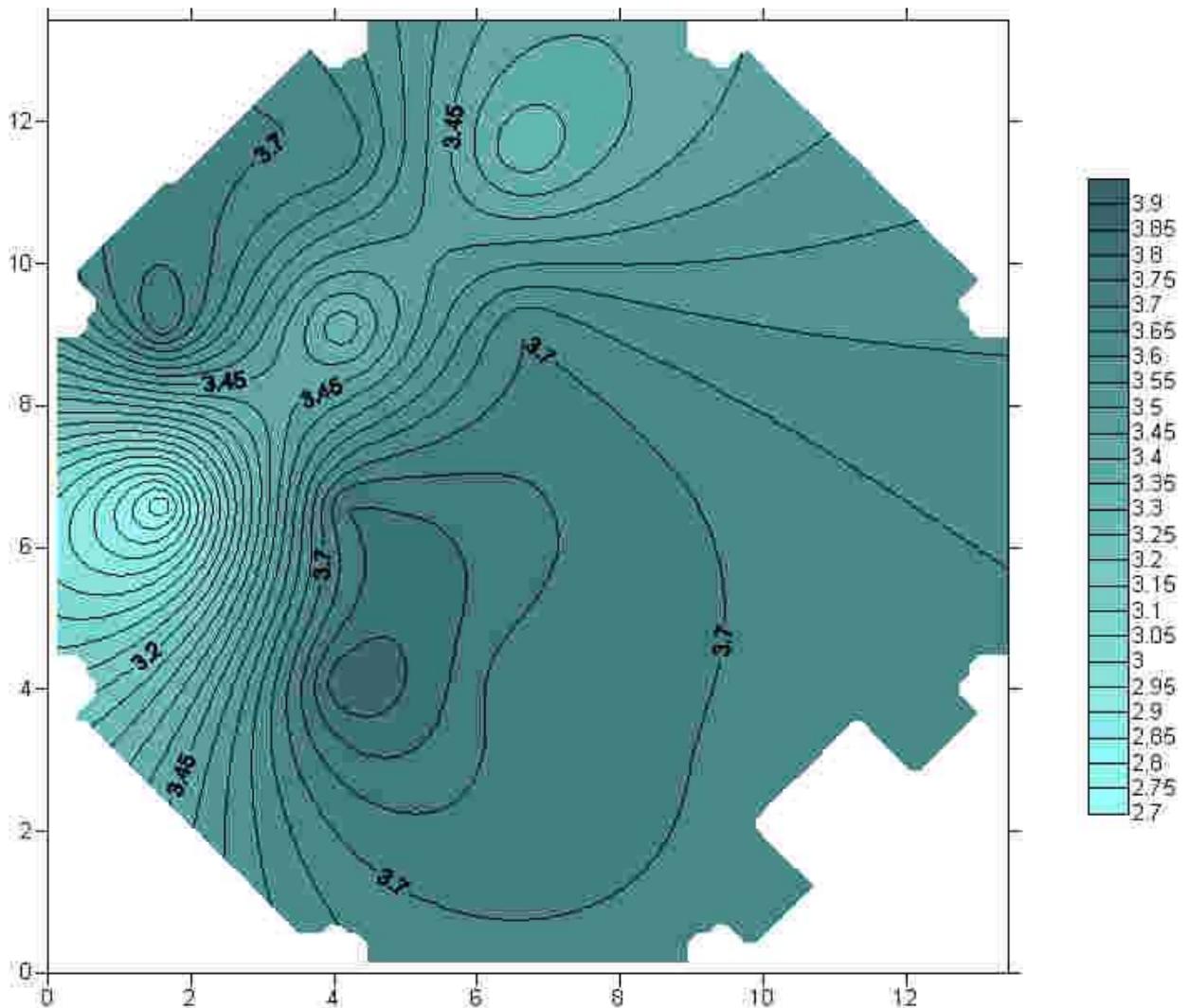


Figura 3.17: Mappa dell'indice di chiarezza  $C_{80}$  simulato a 2000 Hz.

M3	M4	M6	M8	M9	M12	M13	M14	M16	M17
C80									
dB									
-1,32	-2,05	-4,71	-3,22	-6,47	-4,79	-3,56	-5,01	-0,29	-4,74
3,7	3,9	3,7	3,8	2,7	3,7	3,3	3,8	3,3	3,7

Tabella 3.24: Confronto tra l'indice di chiarezza nello stato di fatto iniziale, in grigio, e simulato, in rosso, a 2000 Hz relativi ai diversi ricevitori.

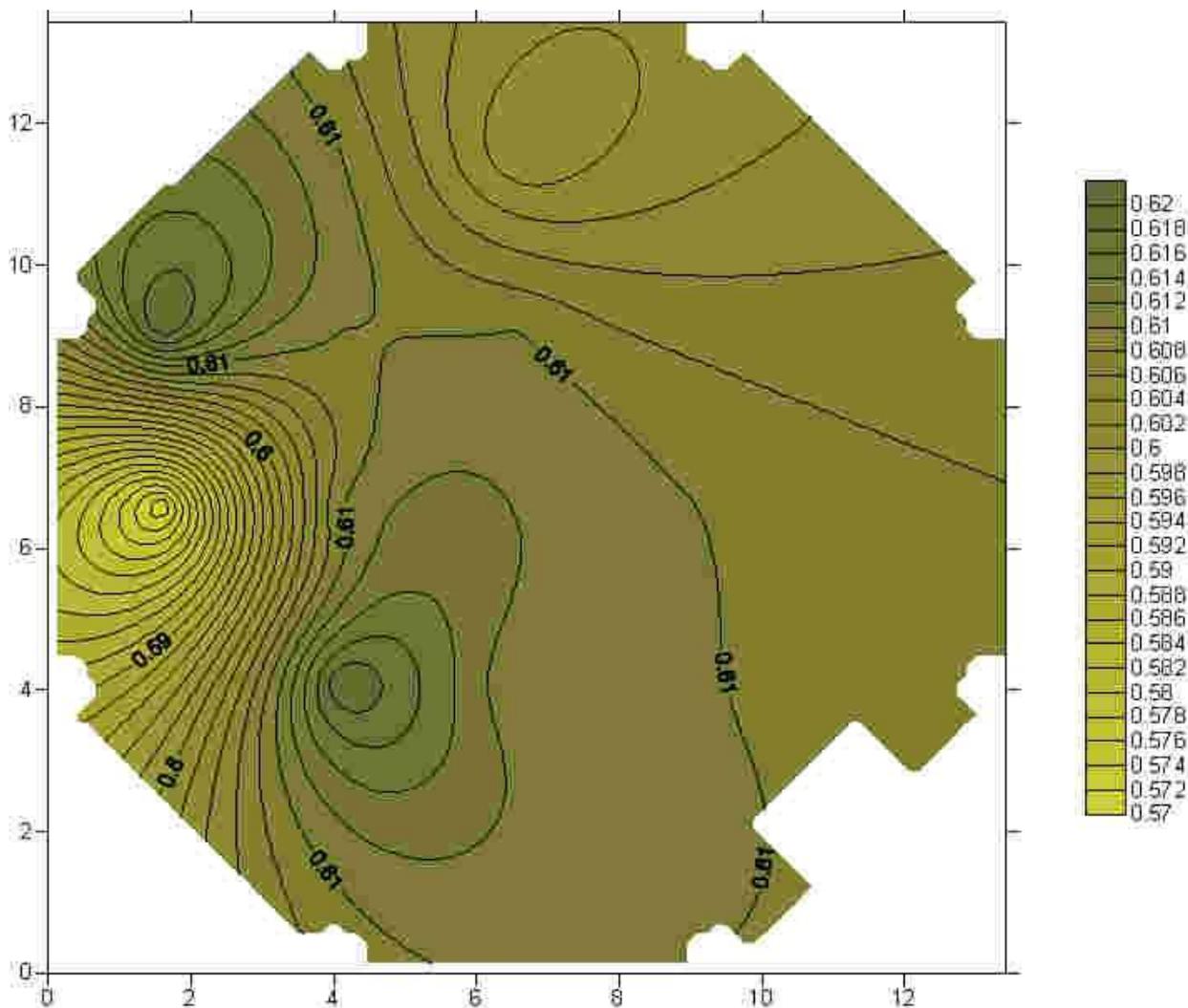


Figura 3.18: Mappa dell'indice STI simulato.

M3	M4	M6	M8	M9	M12	M13	M14	M16	M17
STI									
0,47	0,46	0,41	0,4	0,42	0,44	0,43	0,47	0,49	0,46
0,61	0,62	0,61	0,61	0,57	0,61	0,61	0,62	0,6	0,61

Tabella 3.25: Confronto tra l'indice STI nello stato di fatto iniziale, in grigio, e simulato, in rosso, relativi ai diversi ricevitori.

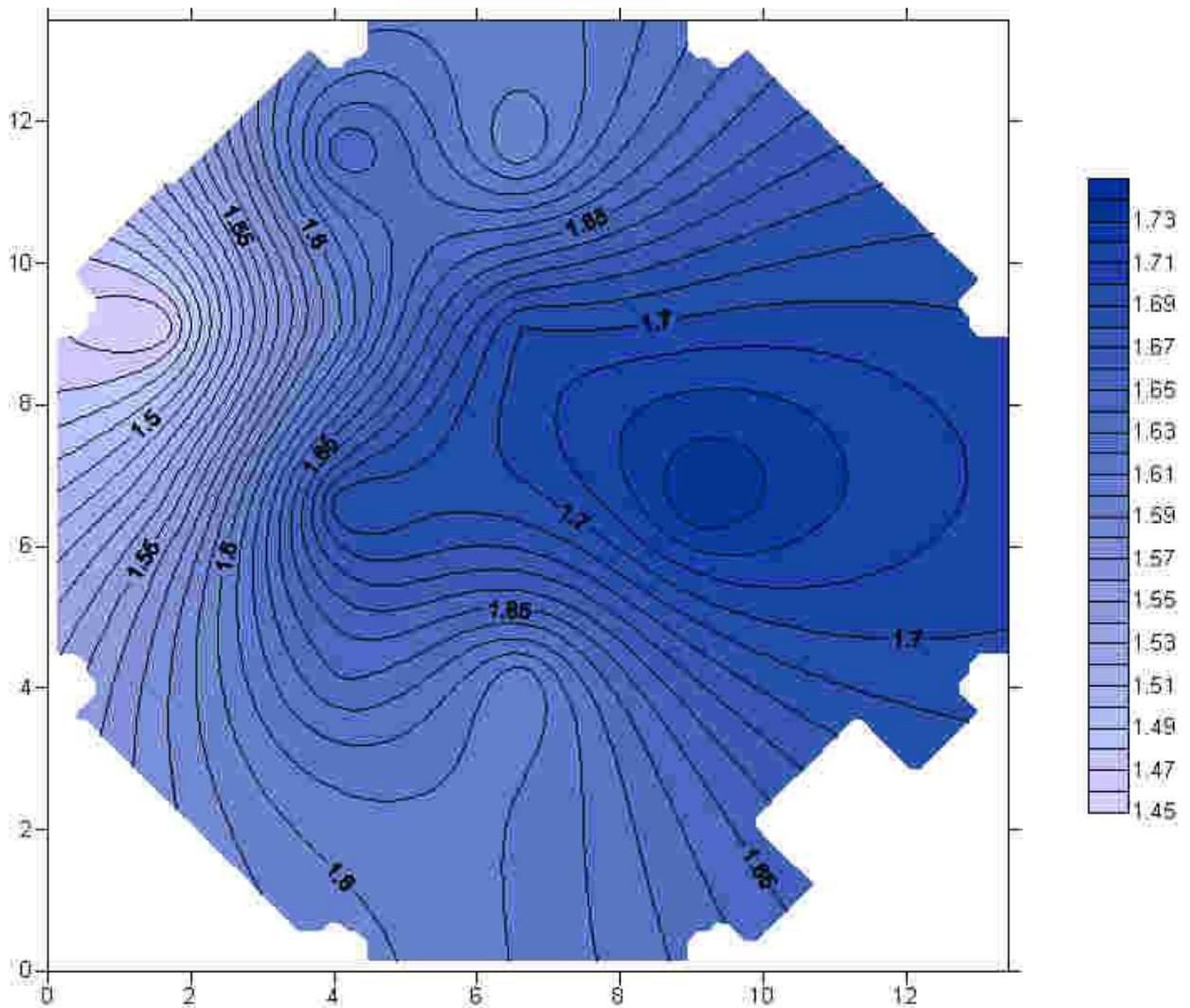


Figura 3.19: Mappa dell'indice EDT simulato a 125 Hz.

M3	M4	M6	M8	M9	M12	M13	M14	M16	M17
EDT	EDT	EDT	EDT	EDT	EDT	EDT	EDT	EDT	EDT
s	s	s	s	s	s	S	s	s	s
3,8	2,99	4,75	4,22	2,2	3,81	2,72	2,94	1,92	3,46
1,6	1,64	1,74	1,7	1,54	1,7	1,6	1,45	1,59	1,65

Tabella 3.26: Confronto tra l'indice EDT nello stato di fatto iniziale, in grigio, e simulato, in rosso, a 125 Hz relativi ai diversi ricevitori.

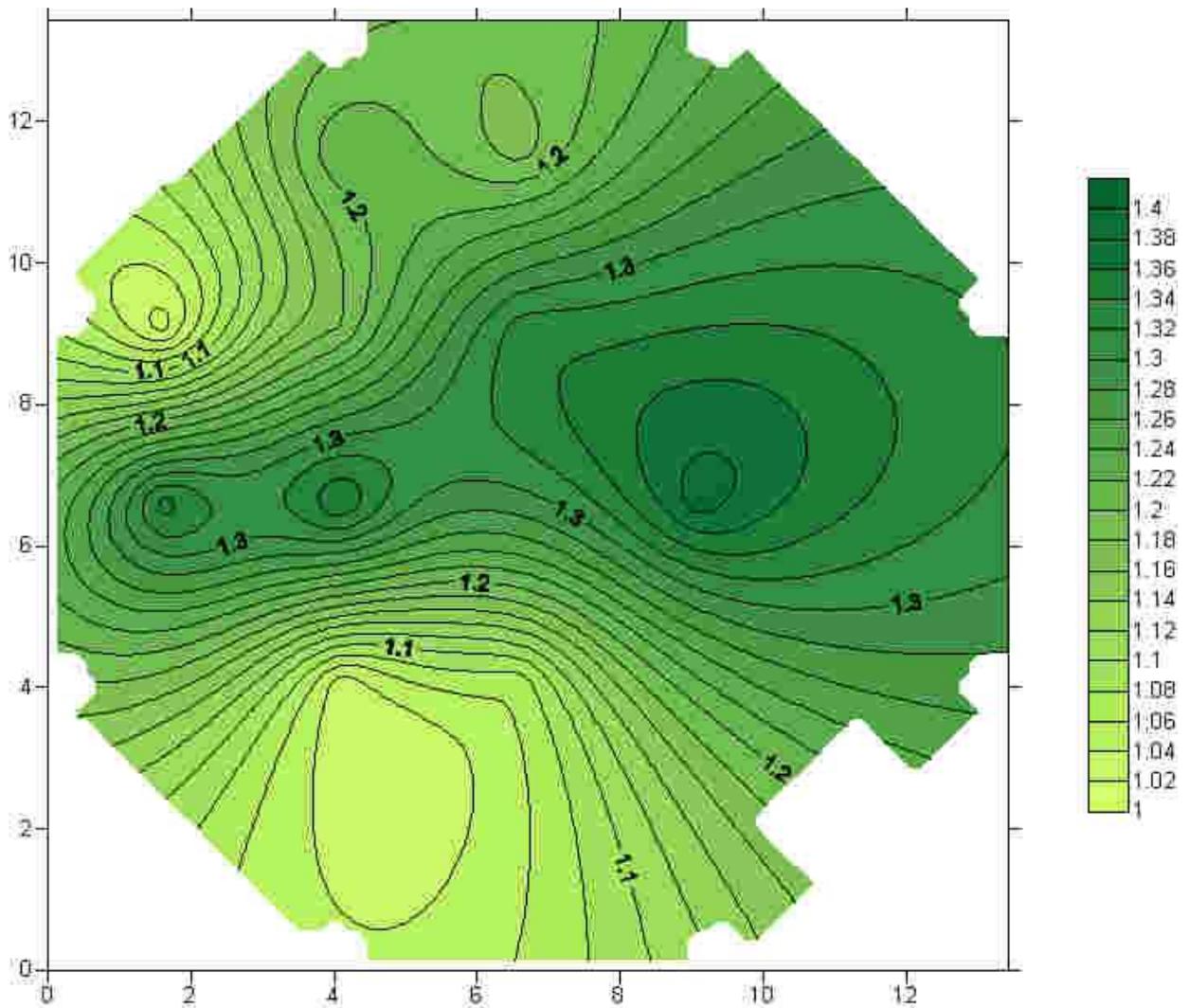


Figura 3.20: Mappa dell'indice EDT simulato a 250 Hz.

M3	M4	M6	M8	M9	M12	M13	M14	M16	M17
EDT									
s	s	s	s	s	s	S	s	s	s
4,6	2,9	4	3,72	2,52	4,86	3,04	3,11	2,17	3,68
1,07	1,03	1,39	1,36	1,35	1,33	1,18	1,01	1,17	1,22

Tabella 3.27: Confronto tra l'indice EDT nello stato di fatto iniziale, in grigio, e simulato, in rosso, a 250 Hz relativi ai diversi ricevitori.

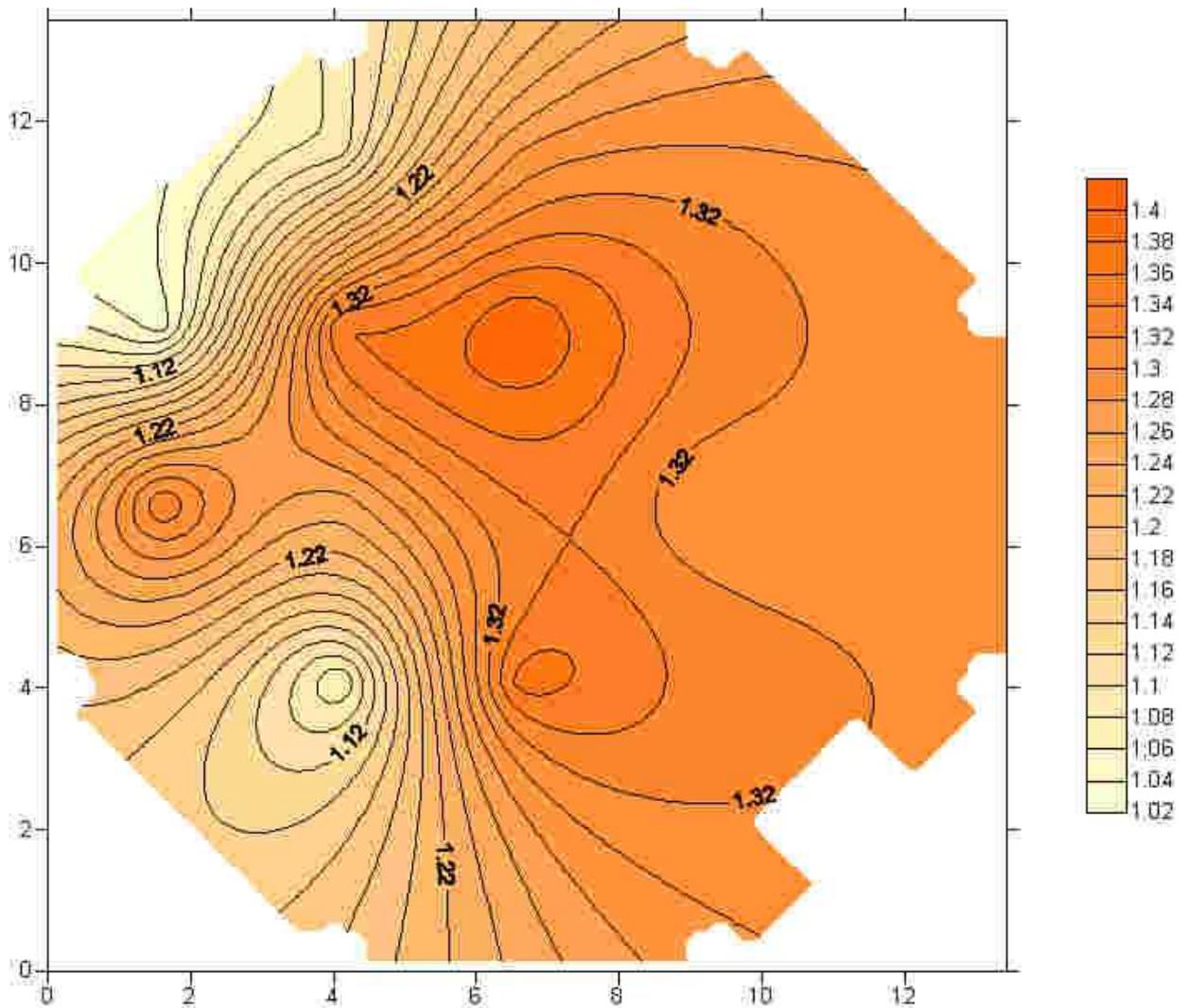


Figura 3.21: Mappa dell'indice EDT simulato a 500 Hz.

M3	M4	M6	M8	M9	M12	M13	M14	M16	M17
EDT	EDT	EDT	EDT	EDT	EDT	EDT	EDT	EDT	EDT
s	s	s	s	s	s	S	s	s	s
5,5	3,97	5,96	5,55	3,79	6,2	4,05	4,09	2,98	3,44
1,37	1,06	1,3	1,25	1,34	1,4	1,36	1,03	1,28	1,09

Tabella 3.28: Confronto tra l'indice EDT nello stato di fatto iniziale, in grigio, e simulato, in rosso, a 500 Hz relativi ai diversi ricevitori.

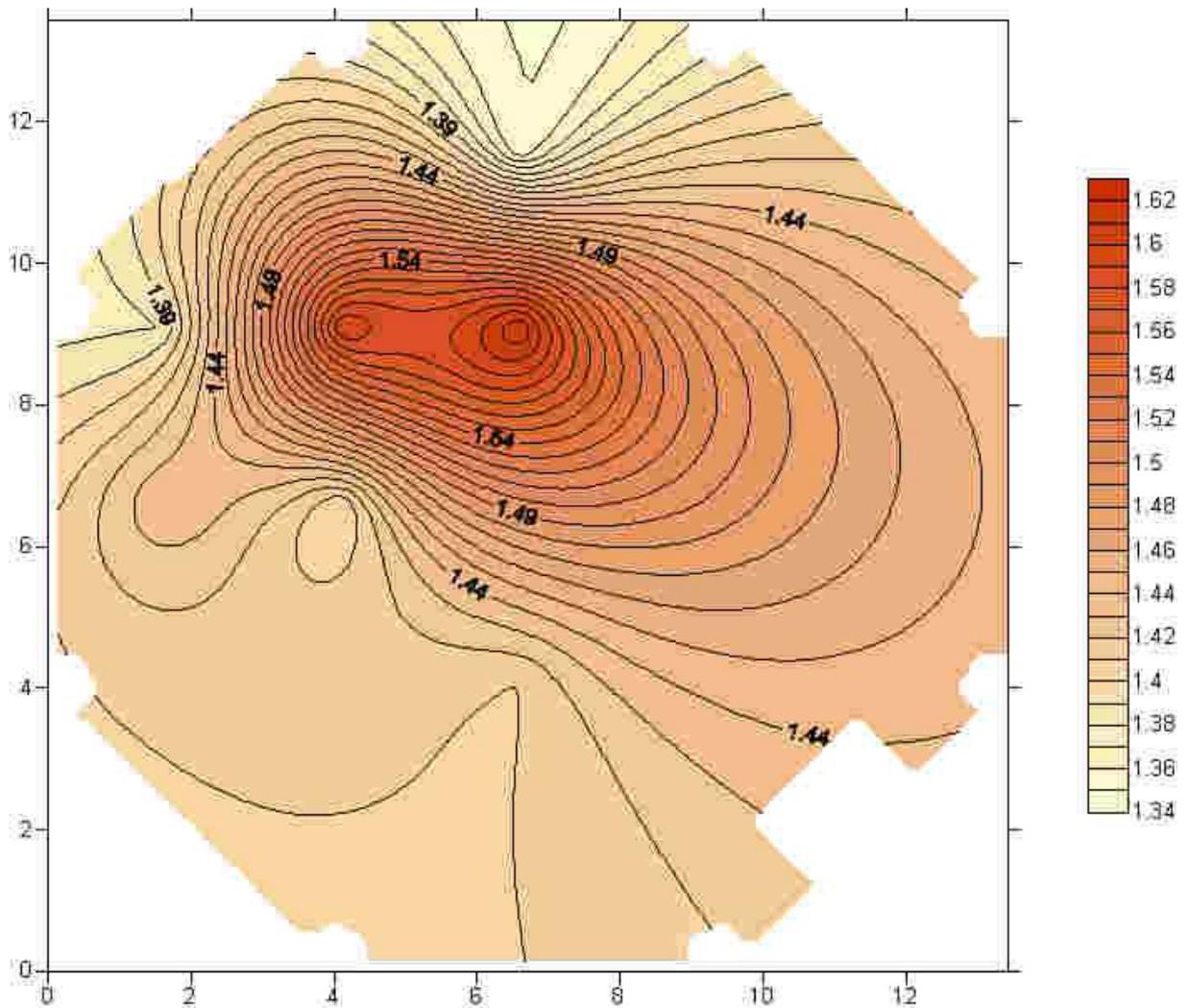


Figura 3.22: Mappa dell'indice EDT simulato a 1000 Hz.

M3	M4	M6	M8	M9	M12	M13	M14	M16	M17
EDT									
s	s	s	s	s	s	s	s	s	s
4,53	4,39	5,32	4,88	4	4,73	4,66	4,16	3,26	4,1
1,41	1,42	1,49	1,4	1,44	1,62	1,6	1,38	1,35	1,44

Tabella 3.29: Confronto tra l'indice EDT nello stato di fatto iniziale, in grigio, e simulato, in rosso, a 1000 Hz relativi ai diversi ricevitori.

### 3.5 ULTERIORI CONSIDERAZIONI

Rispetto al modello architettonico in esame le soluzioni proposte (pannelli perforati o pannelli vibranti + riflettori) realizzano pienamente gli obiettivi qualitativi indicati dallo standard ISO 3382.

Per giudicare al meglio le diverse proposte è necessario ricordare che la finestra di grandezze indicata per ciascun descrittore dall'ISO 3382 è funzione del tipo di evento sonoro. Questo vuol dire che non necessariamente ad un minor valore di EDT corrisponde un'acustica migliore in senso assoluto.

Nel dettaglio: un alto valore della chiarezza aumenta sicuramente la focalizzazione sonora e l'intelligibilità del parlato ma può sbilanciare timbricamente verso le alte frequenze l'ascolto musicale. Allo stesso modo un basso valore di EDT è preferibile per l'ascolto del parlato ma può rendere troppo 'secca' l'esecuzione di un quartetto d'archi. E' utile allora, come nel caso proposto, inserire strutture mobili (ad es. le tende su porte e finestroni) che possano correggere dinamicamente l'acustica del luogo. Non si trascuri, infine, il contributo assorbente fornito dal pubblico.

## CONCLUSIONI

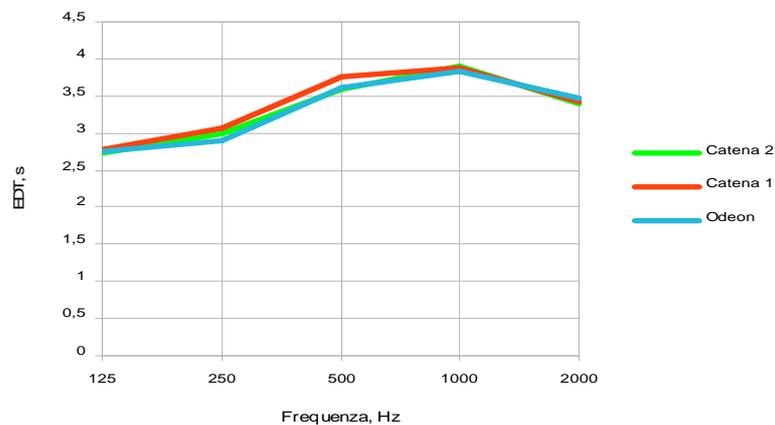
Le misurazioni acustiche compiute nello stato di fatto della torre dell'ex Carico dell'Acqua di Budrio confermano un'acustica non aderente ai requisiti indicati dalla norma tecnica ISO 3382.

	ISO 3382	STATO DI FATTO
<b>C<sub>80</sub>, dB</b>	>0 dB	-6 dB
<b>EDT, s</b>	1.5 s; 2 s	6 s
<b>STI</b>	>0.6	0.39

**Tabella 4.1: Confronto tra i valori indicati dalla norma ISO 3382 e quelli relativi allo stato di fatto iniziale.**

Per riprodurre in maniera fedele l'acustica dell'ambiente esaminato è stato necessario realizzare un modello di simulazione tridimensionale, che è stato successivamente tarato con riferimento alle misurazioni compiute.

La taratura è stata effettuata modificando i valori del coefficiente di assorbimento delle componenti della sala.



**Figura 4.2: Grafico di confronto tra i valori dell'EDT nello stato di fatto iniziale ed i valori simulati.**

Per quanto riguarda il C<sub>80</sub>, i valori misurati e quelli simulati risultano confrontabili.

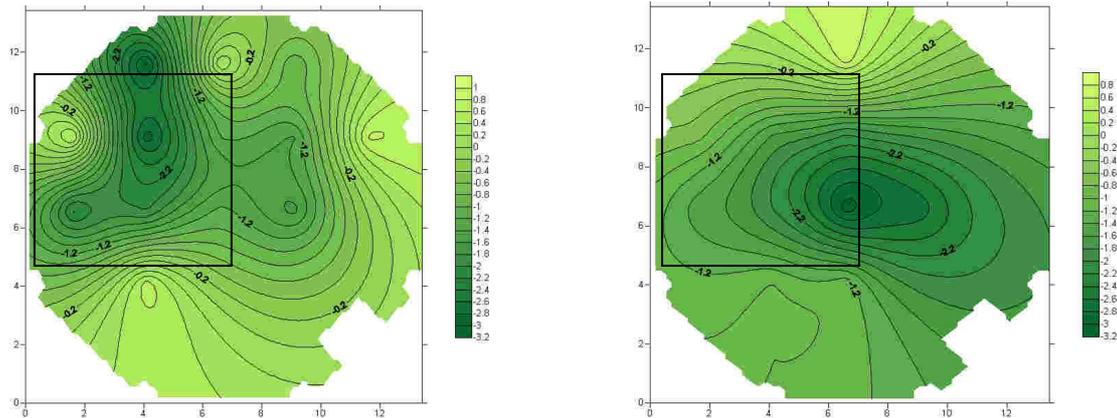


Figura 4.3: Confronto tra l'indice di chiarezza  $C_{80}$  nello stato di fatto iniziale e simulato a 250 Hz.

Data la destinazione d'uso dell'ambiente, sono indicati tre diversi interventi di correzione :

1. Ridurre il tempo di riverberazione ( $1.5 < EDT < 2$ );
2. Concentrare la maggior parte dell'energia sonora nelle prime riflessioni ( $C_{80} > 0$ );
3. Aumentare l'intelligibilità del parlato ( $STI > 0.6$ ).

L'analisi spettrale dell'EDT misurato rivela una situazione critica a partire dalle frequenze medio-basse.

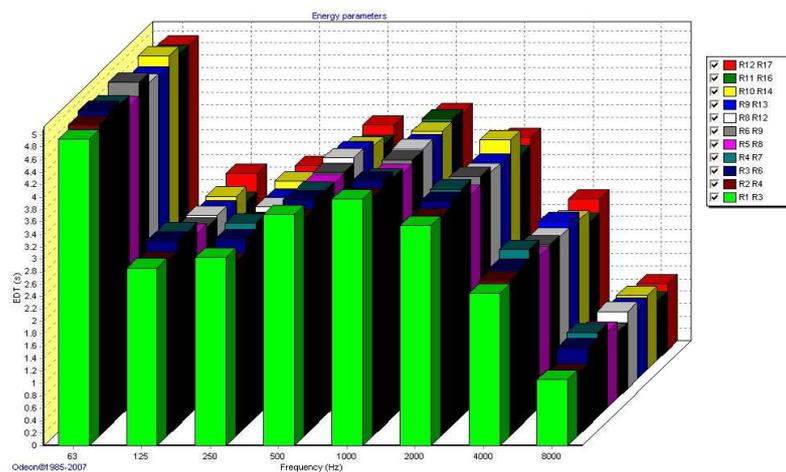


Figura 4.4: Andamento medio dell'indice EDT relativo ai ricevitori.

Il tempo di riverberazione è legato, per l'equazione di Sabine, all'assorbimento acustico equivalente delle superfici.

Dati i vincoli architettonici, gli strumenti utilizzabili per gli interventi correttivi dell'EDT sono, oltre l'area di assorbimento equivalente delle sedie, l'aumento del coefficiente di assorbimento acustico delle pareti laterali prive di aperture.

Per correggere l'EDT sono stati proposti (par.3.2, 3.3) quindi due interventi correttivi:

- Pannello forato;
- Pannello vibrante ricoperto con materiale assorbente.

Ricevitori	M3	M4	M6	M8	M9	M12	M13	M14	M16	M17
Frequenza	EDT									
Hz	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s
125	2,08	2,02	2,04	1,81	1,92	1,94	1,87	1,87	1,85	1,8
250	1,2	1,33	1,04	1,04	1,26	1,06	1,04	1	1,35	1,07
500	1,39	1,19	1,28	1,3	1,19	1,29	1,2	1,14	1,15	1,08
1000	1,39	1,46	1,31	1,45	1,5	1,37	1,25	1,38	1,48	1,31
2000	1,66	1,57	1,69	1,66	1,66	1,59	1,48	1,53	1,5	1,7

**Tabella 4.2: Valori dell' EDT ottenuti con pannelli forati sulle pareti laterali.**

Ricevitori	M3	M4	M6	M8	M9	M12	M13	M14	M16	M17
Frequenza	EDT									
Hz	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s
125	2,38	2,47	2,34	2,27	2,23	2,34	2,29	2,29	2,3	2,27
250	1,76	1,58	1,66	1,75	1,6	1,7	1,74	1,68	1,55	1,52
500	1,51	1,6	1,4	1,5	1,64	1,42	1,64	1,56	1,62	1,37
1000	1,56	1,72	1,56	1,57	1,57	1,53	1,79	1,69	1,67	1,66
2000	1,51	1,44	1,44	1,46	1,51	1,42	1,61	1,5	1,65	1,47

**Tabella 4.3: Valori dell' EDT ottenuti con pannelli vibranti sulle pareti laterali.**

Entrambi gli interventi hanno effetti sulle riflessioni di ordine superiore contribuendo quindi a raggiungere gli obiettivi per quanto riguarda la  $C_{80}$ .

Ricevitori	M3	M4	M6	M8	M9	M12	M13	M14	M16	M17
Frequenza	C80									
Hz	dB									
125	2	1,2	2,1	2,3	1	2,4	1,2	1,6	0,7	1,5
250	4,7	4,2	5,2	5	3,8	5	4,2	4,8	3,8	4,8
500	4,4	3,9	4,9	4,8	3,3	4,8	4	4,3	3,3	4,3
1000	3,8	3,1	4,1	4,1	2,5	4,2	3,1	3,4	2,5	3,3
2000	2,9	2	3,1	3,1	1,4	3,3	2,2	1,9	1,2	2

**Tabella 4.4: Valori di  $C_{80}$  ottenuti con pannelli forati sulle pareti laterali.**

Ricevitori	M3	M4	M6	M8	M9	M12	M13	M14	M16	M17
Frequenza	C80	C80	C80	C80	C80	C80	C80	C80	C80	C80
Hz	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB
125	0,9	-0,1	2,1	2,3	-0,3	0,9	-0,4	0,5	-0,8	-0,4
250	2,3	1,8	5,2	5	1,3	2,4	1,5	2,3	1,1	1,7
500	3,2	2,6	4,9	4,8	2	3,2	2,2	2,9	1,7	2,4
1000	2,8	2,1	4,1	4,1	1,5	2,9	1,7	2,3	1,1	1,7
2000	3,3	2,5	3,1	3,1	1,9	3,3	2,2	2,6	1,5	2

Tabella 4.5: Valori di  $C_{80}$  ottenuti con pannelli vibranti sulle pareti laterali.

Inoltre, per aumentare i valori di STI sono stati dimensionati (par.3.4) un insieme di riflettori piani.

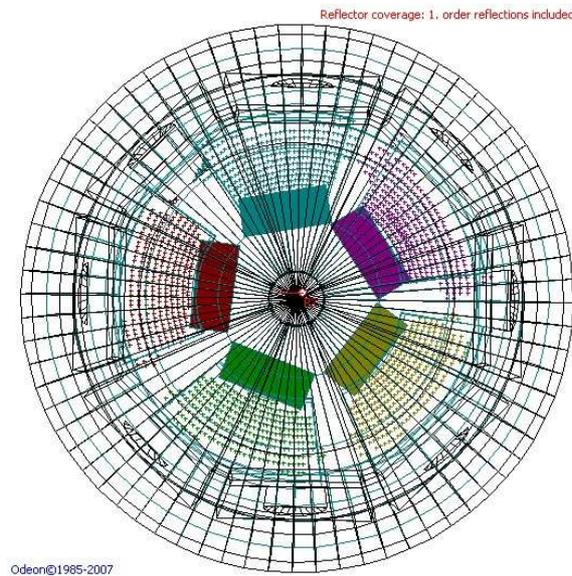


Figura 4.5: Coverage dei riflettori dall'alto. I cinque riflettori, rappresentati con cinque colori diversi, indirizzano le prime riflessioni verso la platea.

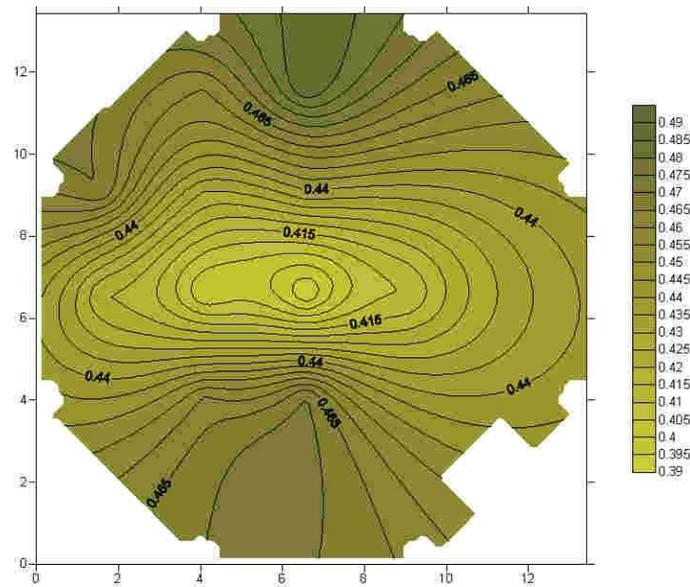


Figura 4.6: Andamento dell'indice STI nello stato di fatto iniziale.

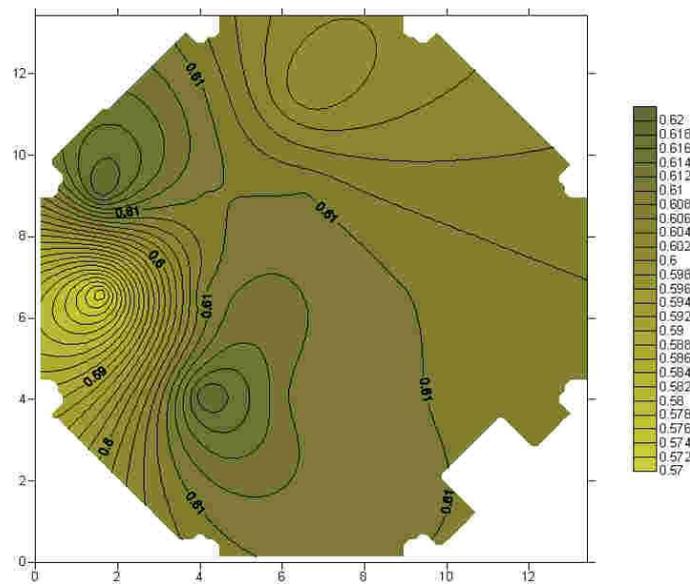


Figura 4.7: Andamento dell'indice STI in seguito ai diversi interventi.

Gli interventi proposti risultano adeguati alle richieste di flessibilità d'uso dell'ambiente, compatibili con il progetto architettonico, di facile installazione e manutenzione.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

### Abbreviazioni:

*J. Acoust. Soc. Am.*: The Journal of the Acoustical Society of America

*J. Sound Vib.*: Journal of Sound and Vibration

*Appl. Acoust.*: Applied Acoustics

[1] **C.L.Christensen**, A room acoustical computer model for industrial environment – the model and its verification. Department of Acoustics Technology, Technical University of Denmark.

[2] **P.Svensson**, The early history of ray tracing in Room Acoustics. Reprint from Reflections on sound in honour of A.Krokstad. Norwegian University of Science and Technology. Trondheim, June 2008.

[3] **M.Barron**, Using the standard on objective measures for concert auditoria, ISO 3382, to give reliable results. Acoustical Science and Technology. Vol. 26 (2005), No.2 Special issue on Room Acoustics in honour of RADS 2004 pp.162-169.

[4] **M.Barron**, Interpretation of Early Decay Times in concert auditoria, *Acustica*, 81, 320-331 (1995).

[5] **T.Hidaka, N.Nishihara, L.L.Beranek**, Relation of acoustical parameters with and without audiences in concert halls and a single method for simulating the occupied state, *J. Acoust. Soc. Am.*, 109, 1028-1042 (1992).

[6] **A.Takatsu, H.Sakai, Y.Ando**, Blending Architectural and Acoustical Factors in designing a round event hall, *J. Acoust. Soc. Am.*, Volume 110, Issue 1, pp.27-27 (June 2001).

- [7] **A.Celestino S.B.Nielsen**, Low-Frequency LoudSpeaker –Room Simulation Using Finite Differences in the time Domain – Part 1: Analysis. JAES Volume 56 Issue 10 pp. 772-786. October 2008.
- [8] ISO 3382-1, Acoustics-Measurement of room acoustic parameters- Part 1: Performance rooms.
- [9] ISO 3382-2, Acoustics- Measurement of room acoustic parameters – Part 2: Reverberation time in ordinary rooms.
- [10] **G.M.Naylor**, ODEON – Another Hybrid Room Acoustical Model, *Appl. Acoust.* Vol. 38 no. s 2-4, pag.131 (1993).
- [11] **H.Lehnert, J.Blauert**, Principles of binaural room simulation, *Appl. Acoust.* 36, 259-291, 1992.
- [12] **A.Krokstad, S.Strom, S.Sorsdal** (1968), Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique., *J. Sound Vib.* 8, pp.118-125.
- [13] **F.V.Hunt** (1964), Remarks on mean free path problem, *J. Acoust. Soc. Am.* 36, pp 556-564.
- [14] **A.Cocchi, A.Farina**, Rilevamento sperimentale delle caratteristiche acustiche dei teatri e delle sale da spettacolo, Atti del XVI Convegno AIA 1988, Milano.
- [15] **A.Cocchi, A.Farina**, Utilizzo di ex chiese come sale polifunzionali.
- [16] **R.Spagnolo**, *Manuale di acustica applicata*, UTET 2004.
- [17] **H.Kuttruff**, *Room Acoustics*, London and New York, Elsevier Applied Science Publishers, 1991.

[18] **F.A.Everest**, *Manuale di acustica applicata*, Hoepli Milano, 1996.

[19] **M.Barron**, *Auditorium acoustics and architectural design*, London [etc.]: E & FN Spon, 1993.-XV.

[20] ODEON, [www.odeon.dk](http://www.odeon.dk)

[21] <http://pcfarina.eng.unipr.it/Public/Corsoacustica/>