

APPENDICE 2

COMPLEMENTI DI ACUSTICA ARCHITETTONICA: QUALITÀ ACUSTICA DELLE SALE

(a cura di Ing. Davide Foppiano)

2.1 GENERALITÀ

La qualità acustica delle sale da concerto e delle grandi sale multiuso è da anni oggetto di notevole attenzione anche se non si è ancora raggiunta una procedura univoca per la loro progettazione. Indagini effettuate elaborando statisticamente giudizi soggettivi di un gran numero di ascoltatori hanno dimostrato che, al di là delle valutazioni soggettive, esistono alcuni parametri oggettivi del campo acustico atti a caratterizzare acusticamente gli ambienti.

Nel corso degli anni, numerosi studiosi hanno proposto vari metodi di determinazione di questi parametri, assegnando a ciascuno di essi un diverso peso.

Il primo esempio in questo senso fu dato da W.C. Sabine (di cui già si è discusso nella II Parte del Corso) il quale, all'inizio del secolo, individuò come parametro fondamentale il "tempo di riverberazione", ne studiò i valori ottimali per i vari tipi di musica e fornì una semplice relazione per il suo calcolo.

Il primo serio tentativo di giungere ad una caratterizzazione più approfondita delle sale da concerto è rappresentato dall'opera di Leo Beranek intitolata "Music, acoustic and Architecture", pubblicata nel 1962. Dopo aver raccolto informazioni sulla geometria, sulla natura delle superfici interne, sui tempi di riverberazione e tanti altri dettagli di 54 sale da concerto e teatri d'opera, Beranek fece compilare dettagliati questionari a 50 fra direttori d'orchestra e critici musicali. Molti di essi aggiunsero le loro opinioni personali che, unite a quelle dell'autore, vennero inserite nella valutazione complessiva con un sistema a punteggio. Beranek visitò personalmente tutte le 54 sale da lui considerate, per controllare l'esattezza dei dati fornitigli, dei disegni e dei materiali. In contrasto con l'estrema cura con cui Beranek maneggiò i dati oggettivi delle sale, appare piuttosto arbitraria la tecnica di manipolazione dei giudizi soggettivi di qualità; infatti, egli presumibilmente operò qualche selezione dei giudizi ricevuti e diede un peso meno rilevante alle proprie opinioni personali. Beranek classificò le sale in relazione al punteggio ottenuto in 5 classi di qualità:

- A+ ***Eccellente*** (sale che ottengono da **90 a 100** punti);
- A da ***Molto buona*** a ***Eccellente*** (sale che ottengono da **80 a 90** punti);
- B+ da ***Buona*** a ***Molto buona*** (sale che ottengono da **70 a 80** punti);
- B da ***Sufficiente*** a ***Buona*** (sale che ottengono da **60 a 70** punti);
- C+ ***Sufficiente*** (sale che ottengono da **50 a 60** punti).

Una sesta categoria (per punteggi inferiori a 50 punti) comprende le sale risultanti avere qualità acustica globale **non accettabile**.

Tutte le 54 sale considerate in questo studio risultano di qualità almeno sufficiente anche in conseguenza del fatto che nessuna di esse ha, per esempio, una forma circolare, o ellittica, o molto lunga e stretta, o molto corta e larga; nessuna presenta cupole o soffitti molto bassi; in nessuna si generano echi importanti, e così via. A parte la confusione generata dall'uso di termini descrittivi di carattere spesso solo qualitativo, appare poco rigorosa la stessa suddivisione in cinque classi della quale non vengono illustrate dettagliatamente le caratteristiche.

Lo schema di valutazione di Beranek prevede la determinazione di numerosi parametri oggettivi, tra i quali compare il tempo convenzionale di riverberazione, che non è però considerato il più importante; ciò è evidente dal fatto che le sei sale del gruppo **A+** hanno tempi di riverberazione varianti da 1.7 a 2.05 (s); quelle del gruppo **A** vanno da 1.2 a 2 (s), e così via. Beranek concluse che altre proprietà positive possono compensare tempi di riverberazione non adeguati. Fra queste egli trovò che la più importante è il **tempo di ritardo** fra il suono diretto e la prima forte riflessione.

Questo parametro oggettivo, che si tratterà più approfonditamente nel paragrafo successivo, fu chiamato “**initial time delay gap**” (**ITDG**, ovvero intervallo temporale di ritardo iniziale). L'importanza dell'**ITDG** è evidente dal fatto che esso risulta inferiore a 20 (ms) in tutte le sale del gruppo **A+**, minore di 33 (ms) nelle sale del gruppo **A**, minore di 57 (ms) per le sale del gruppo **B**; per una sola sala del gruppo **C** (la Royal Albert Hall di Londra) il valore è di 70 (ms). Tutti questi valori furono calcolati da Beranek a tavolino, mediante la tecnica di costruzione dei raggi sonori con riflessione speculare, sui disegni delle sale. Egli assegnò all'**ITDG** un rilevante peso nella sua scala di valutazione, 40 punti sui 100 totali disponibili.

Ciascun parametro oggettivo viene dotato di una scala di comparazione, che fornisce il corrispondente valore del punteggio di valutazione; la scala di comparazione può anche fornire valori negativi del punteggio, che in questo caso sono sottratti dalla somma delle altre grandezze positive. Esiste anche un punteggio (sempre negativo) per i difetti acustici più evidenti, quali eco molto pronunciati o eccessivo rumore dell'impianto di ventilazione: ciascuno di questi difetti può produrre fino a 50 punti di penalizzazione, rendendo così la sala **non “usabile”** (Beranek indica così le sale il cui punteggio complessivo è inferiore a 50). La connessione fra aspetti oggettivi e soggettivi è la parte del lavoro di Beranek che ha generato critiche: egli infatti individua numerosi aspetti soggettivi: **Intimacy** (intimità), **Liveness** (vivezza), **Warmth** (calore), **Loudness of the direct sound** (intensità del suono diretto), **Loudness of the reverberant sound** (intensità del suono riverberato), **Definition** (definizione), **Brilliance** (brillantezza), **Diffusion** (diffusione), etc.

Alcune di queste qualità soggettive sono unicamente correlate (ad esempio, l'intimità è collegata all'ITDG) con criteri oggettivi mentre altre danno luogo a connessioni multiple (ad esempio sia la vivezza del suono che la pienezza delle note sono correlate con il tempo di riverberazione alle medie frequenze). Questi termini hanno influenzato per anni i successivi giudizi di qualità, ma lo scarso rigore con cui erano stati definiti, e la più o meno grande interdipendenza fra essi hanno in effetti creato più problemi di quanti ne abbiano risolti. Nel seguito si fornisce un'analisi descrittiva di alcuni dei più significativi parametri acustici che caratterizzano le prestazioni acustiche delle sale.

2.2 TEMPO DI RIVERBERAZIONE

2.2.1 Generalità

Come già visto durante il corso, il comportamento acustico degli ambienti chiusi è caratterizzato dalla presenza della *riverberazione*, ossia dalle conseguenze prodotte dai successivi rinvii dell'energia sonora da parte delle pareti di confine e degli eventuali oggetti presenti all'interno dell'ambiente.

Il campo sonoro risulta, perciò, costituito dalla sovrapposizione del campo diretto, dovuto alle onde sonore irradiate direttamente dalla sorgente, e del campo riverberato, prodotto dall'insieme dell'energia sonora rinviata. All'inizio del secolo Wallace Clement Sabine, professore di fisica di Harvard, fu chiamato a correggere l'acustica del Fogg Art Museum che soffriva di eccessiva riverberazione (il parlato era, infatti, incomprensibile a tutti gli ascoltatori tranne a quelli seduti nelle prime file). Dopo studi accurati, Sabine determinò la legge omonima che collega la riverberazione con il **volume** e le **superfici dell'ambiente**. Il tempo di riverberazione, come si ricorderà, è definito come segue:

$$\tau_c = 0.16 \frac{V}{\sum_i a_i S_i}$$

in cui **V** è il volume dell'ambiente, S_i è la superficie *i*-esima di parete di tipo *i* ed a_i i corrispondenti fattori di assorbimento apparente delle superfici stesse.

I coefficienti di assorbimento apparente a_i rappresentano l'unico dato incerto, ma lo stesso Sabine risolse brillantemente questo problema: è infatti sufficiente confrontare i tempi di riverberazione misurati in uno stesso ambiente prima e dopo l'introduzione di una superficie nota di un certo materiale ed applicando due volte la formula di Sabine si ottiene il coefficiente di assorbimento del materiale introdotto.

Grazie ai risultati ottenuti Sabine fu in grado di ottenere la quantità di materiale fonoassorbente da introdurre nell'auditorium in esame, che migliorò notevolmente dal punto di vista acustico.

Negli anni successivi Sabine perfezionò i suoi studi, affrontando il complesso campo dell'individuazione dei tempi di riverberazione ottimali per i vari eventi acustici: ad esempio, risultò subito chiaro che il parlato richiedeva meno riverberazione della musica e che i diversi generi musicali richiedevano ambienti adatti.

La relazione teorica di Sabine presuppone che tutti i punti dell'ambiente siano caratterizzati dallo stesso tempo di riverberazione e cioè che il decremento della energia sonora D sia la medesima in tutti i punti (uniforme diffusione dell'energia sonora). Questa ipotesi è sostanziosamente corretta solo se le tre dimensioni dell'ambiente sono non molto dissimili tra loro e può perdere significato in ambienti di forma inusuale.

Un'altra condizione è quella di poter trattare le pareti come se fossero dotate tutte dello stesso fattore di assorbimento α_m pari alla media ponderata dei fattori di assorbimento delle superfici stesse.

Una terza quarta condizione consiste nel considerare nullo l'assorbimento da parte dell'aria, che viceversa può divenire rilevante in caso di grandi ambienti, specie alle alte frequenze.

Infine, l'ultima condizione è quella di continuità del decadimento sonoro, rappresentato con una curva di tipo esponenziale, mentre in realtà è noto che il primo tratto della curva di decadimento presenta gradini piuttosto evidenti.

2.2.2 Misura del tempo di riverberazione

La rilevazione del tempo di riverberazione può essere effettuata con diversi metodi.

Nel seguito si descrivono le tecniche di misurazione più importanti e diffusamente utilizzate:

- *Interruzione di una sorgente sonora stazionaria;*
- *Sorgente sonora impulsiva.*

Interruzione di una sorgente stazionaria

Questo metodo consiste nel disattivare istantaneamente una sorgente di tipo stazionario dopo aver raggiunto una condizione di regime sonoro, ovvero la massima densità di energia sonora in relazione alla potenza irradiata, e nel valutare la risposta dell'ambiente.

La strumentazione di acquisizione deve comprendere un microfono, un amplificatore del segnale ricevuto e un sistema di registrazione.

Devono essere, inoltre, disponibili filtri passa-banda per la bande di frequenza di una ottava e di un terzo di banda di ottava. Il sistema di registrazione può essere costituito da un registratore analogico di tipo grafico su supporto cartaceo o da equivalenti sistemi digitali.

Utilizzando, dunque, un dispositivo di registrazione che fornisce una traccia stampata della coda sonora, è facile, con un semplice regolo, misurare il tempo necessario a un abbattimento di 60 dB, dopo aver tracciato manualmente una retta per mediare le fluttuazioni (Figura 3. 1).



Figura 3.1

Sorgente sonora impulsiva

Questo metodo consiste nel valutare la risposta dell'ambiente a un rumore impulsivo (rumore ad ampio spettro e di breve durata). Le sorgenti impulsive più comunemente utilizzate sono costituite da scariche elettriche a scintilla, da pistole caricate a salve, da palloni fatti scoppiare e perfino, per spazi più ampi, da piccoli cannoni.

In realtà, con sorgenti di questo tipo è difficile ottenere un effettivo decadimento del livello sonoro di 60 dB; la situazione a cui si giunge è quella illustrata in Figura 3.2.



Figura 3. 2

E' importante cercare di ottenere la massima gamma di decadimento possibile, poiché interessano entrambe le estremità della coda sonora.

E' stato, infatti, dimostrato che, nel valutare la qualità della voce o della musica, per l'orecchio umano sono più importanti i primi 20-30 dB del decadimento.

In ogni caso, non disponendo di un decadimento realmente registrato di 60 dB, la soluzione consiste nell'extrapolare il valore del tempo di riverberazione da una porzione lineare della curva di decadimento.

E' questa l'origine di parametri con **denominazione diversa da quella tradizionale** T_{60} che, indicando sempre il tempo necessario perché la densità di energia sonora nell'ambiente diminuisca di un milione di volte, portano specificato nel loro nome quale parte della curva di decadimento sia stata utilizzata per ottenere quel dato.

Fra di essi quelli di utilizzo più comune sono:

- T_{10} : tempo per decadimento di 60 dB in base al decadimento tra -5 e -15 dB;
- T_{20} : tempo per decadimento di 60 dB in base al decadimento tra -5 e -25 dB;
- T_{30} : tempo per decadimento di 60 dB in base al decadimento tra -5 e -35 dB.

La 0 dimostra, ad esempio, la differenza tra T_{10} e T_{60} .



Figura 3. 3

2.2.3 Tempo di riverberazione ottimale per un ambiente

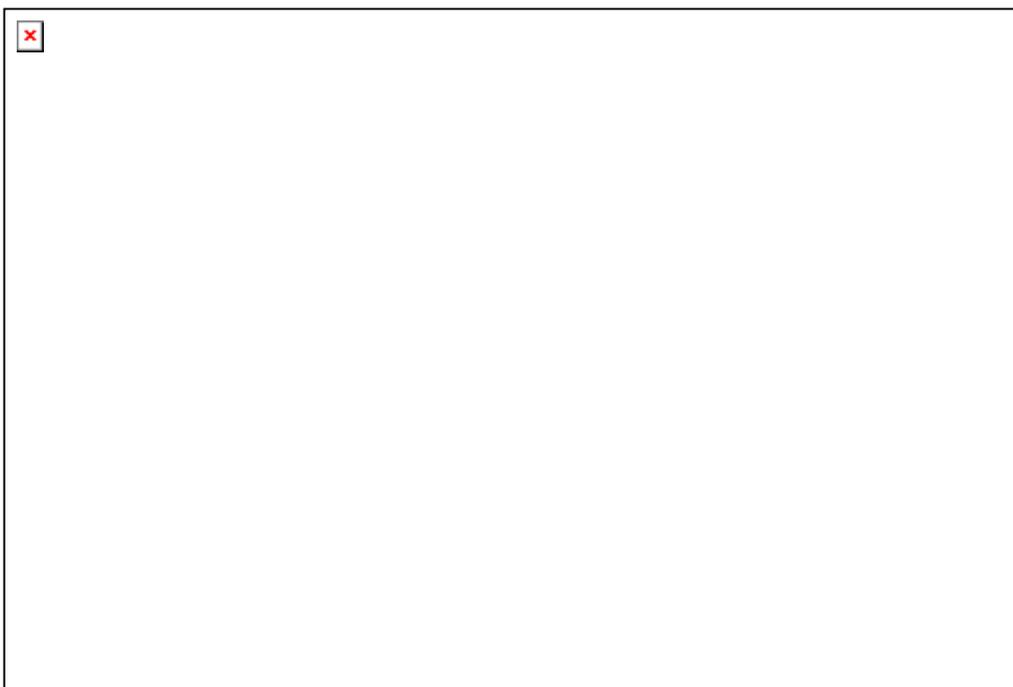
La presenza in un ambiente del campo sonoro riverberato può essere, da un lato, utile ai fini dell'ascolto perché il suo contributo innalza il valore della densità di energia sonora in regime permanente e dall'altro, un valore eccessivo della durata dei transitori d'attacco e di estinzione, può peggiorare la qualità d'ascolto.

Il tempo di riverberazione, parametro che tiene conto del transitorio sonoro in un ambiente, dovrebbe assumere, a seconda delle condizioni d'ascolto, un valore ottimale in modo da offrire il miglior compromesso possibile.

La valutazione di questo valore ottimale deve corrispondere all'elaborazione di un gran numero di dati sperimentali di ascolto, basati su giudizi soggettivi relativi ad ambienti recuperati di buona qualità acustica. In linea generale, si può dire che per sale destinate all'ascolto del parlato si riscontrano valori di T_{60} più brevi, a parità di altre condizioni, che per le sale destinate allo svolgimento di programmi musicali. I valori più brevi si riscontrano nelle sale in cui il suono diretto viene privilegiato rispetto a quello riverberato, come avviene per le sale cinematografiche e, in generale, quando sia presente un sistema elettroacustico di diffusione sonora. In questi casi, infatti, si può sopperire mediante l'impianto elettroacustico alla perdita di densità di energia sonora prodotta dal basso contributo del campo di riverberazione.

All'opposto, i valori ottimali più alti per T_{60} si riscontrano nel caso di ascolto di musica per organo nelle chiese. In questi casi, infatti, il fenomeno della riverberazione è già stato considerato dal compositore di questo tipo di musica come parte integrante del segnale musicale e l'ascolto in un ambiente poco riverberante risulterebbe grandemente impoverito.

Un'altra considerazione di carattere generale riguarda poi il fatto che il **valore ottimale di T_{60} cresce leggermente all'aumentare del volume della sala**, per una determinata destinazione d'uso. Ciò corrisponde intuitivamente al fatto che, all'aumentare del volume della sala, si accetta un lieve peggioramento dell'intelligibilità in favore del livello sonoro, assieme alla sensazione soggettiva di maggiore vastità dell'ambiente che viene spontaneamente associata ad una coda sonora più lunga.



Dal grafico sopra riportato si può notare che per sale destinate all'ascolto della parola si riscontrano valori di tempi di riverberazione più bassi che per le sale destinate allo svolgimento di programmi musicali.

E' interessante notare che il valore del tempo di riverberazione cresce all'aumentare del volume dell'ambiente. Ciò corrisponde al fatto che, all'aumentare del volume della sala, si accetta un lieve peggioramento della limpidezza d'ascolto in favore del livello sonoro.

Sono state riportate anche alcune formule empiriche che forniscono il tempo di riverberazione ottimale. Ad esempio, nel caso dell'ascolto di musica si può applicare, con le dovute cautele (relative al fatto che si riferisca ad un ambiente di forma "compatta"), la formula seguente:

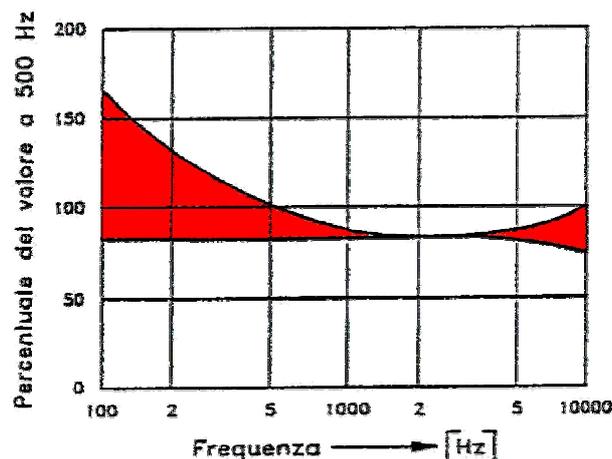
$$T_{60,ott} = 0.1(V^{1/3})$$

Nel caso, invece, di una sala destinata all'ascolto del parlato ci si può riferire alla seguente relazione empirica:

$$T_{60} = 0.5 + 10^{-4}V$$

Entrambe le relazioni forniscono il tempo di riverberazione ottimale in secondi se il volume della sala è espresso in m³.

Occorre osservare che i valori ottimali del tempo di riverberazione, deducibili dai grafici o dalle relazioni empiriche, sono riferiti di solito alla frequenza di 500 Hz. Infatti, poiché il coefficiente di assorbimento delle pareti varia in funzione della frequenza, anche il tempo di riverberazione varia in funzione della frequenza.



Soltanto nei casi più semplici è sufficiente la verifica del tempo di riverberazione ad una sola frequenza; nello studio di grandi auditori assume, invece, grande importanza la determinazione dell'andamento del valore del tempo di riverberazione in funzione della frequenza.

Secondo alcuni studiosi tale andamento dovrebbe essere contenuto all'interno della fascia evidenziata in figura. Secondo questo criterio, si ammette che il tempo di riverberazione alle frequenze più basse possa quasi raddoppiare rispetto al valore corrispondente a 500 Hz; secondo altri, le tolleranze previste sono un male minore mentre il tempo di riverberazione dovrebbe risultare il più possibile uniforme per tutte le frequenze utili dello spettro.

2.3 ALTRI INDICI ACUSTICI OGGETTIVI

2.3.1 Generalità

La valutazione della qualità acustica ambientale si è basata, per molto tempo, sulla sola valutazione del tempo di riverberazione. Tale parametro si è ben presto dimostrato insufficiente a caratterizzare le proprietà acustiche di una sala, poiché, trattandosi di un parametro globale, non si presta a valutazioni locali nei vari punti d'ascolto e non può tener conto delle proprietà di emissione delle sorgenti sonore e delle caratteristiche percettive degli ascoltatori.

In linea generale, si deve distinguere fra la valutazione della qualità acustica delle sale destinate all'ascolto del parlato e delle sale per l'ascolto di programmi musicali. Pur non essendo ancora stato definitivamente risolto il problema, si può affermare che, allo stato attuale, i metodi di analisi impiegati per tentare di valutare la qualità di una sala conducono a risultati più certi nel primo caso. Ciò è facilmente comprensibile se si pensa che, nel caso del parlato, la qualità dell'ascolto si individua più facilmente in base a requisiti abbastanza certi quali il livello sonoro, il rapporto segnale/rumore e l'intelligibilità.

Inoltre, la tipologia della sorgente resta in termini pratici univocamente definita. Nel caso della musica invece, oltre ad aversi tipologie assai diverse per la sorgente sonora, non è facile raggruppare in pochi parametri le impressioni che presentano maggiore soggettività.

Nell'introdurre nuove grandezze che possano assumere il ruolo di indici di qualità, queste devono mettere in luce soprattutto aspetti locali, in modo da poter eseguire l'analisi acustica in punti diversi di un dato ambiente e devono prestarsi ad essere correlabili con giudizi soggettivi di ascolto. Si riportano a questo proposito le definizioni dei principali indici proposti in letteratura.

2.3.2 Early-Decay-Time (EDT)

L'Early-Decay-Time è la misura del tasso di decadimento sonoro, espressa in modo del tutto analogo al tempo di riverberazione stimata sulla base dei primi 10 dB della coda sonora.

In un ambiente con diffusione del suono ideale il decadimento sarebbe lineare e il suo valore coinciderebbe con il tempo di riverberazione. I valori di EDT sono quasi sempre inferiori ad esso e l'entità della discrepanza costituisce un buon giudizio dell'imperfetta diffusione locale.

L'EDT ha dimostrato di essere meglio correlato con le sensazioni psicoacustiche soggettive, provate da ascoltatori esperti nelle medesime posizioni delle rilevazioni, sia del tradizionale tempo di riverberazione che di altri parametri da esso derivati, come il T_{20} , T_{30} , etc.

2.3.3 Early-to-late Sound Index o Objective Clarity (C)

È un indice di chiarezza proposto da Reichardt a metà degli anni '70.

Esso ha il fine di valutare la possibilità, per un ascoltatore, di percepire nitidamente note musicali suonate in rapida successione, nonché di distinguere chiaramente più note suonate simultaneamente da uno o più strumenti.

L'**indice di chiarezza** (C) è definito come il rapporto tra l'energia sonora ricevuta nei primi 80 ms dal suono diretto e quella che giunge successivamente.

$$C_{80} = 10 \log \left(\frac{\int_0^{0.08} p^2(t) dt}{\int_{0.08}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \quad [\text{dB}]$$

dove $p(t)$ è la pressione acustica istantanea nel punto di ascolto.

Con $t = 0$ si intende l'istante in cui il segnale diretto raggiunge il ricevitore. L'estensione del limite a 80 ms discende dal fatto che per la musica è accettabile un certo grado di sovrapposizione fra le note, al contrario che per la parola, e che il transitorio della maggior parte degli strumenti musicali supera i 100 ms. Quanto più il valore di C è elevato, tanto più il suono risulta chiaro.

Al fine di ottenere un unico valore puntuale per C, generalmente vengono mediati i dati ottenuti nelle bande di ottava centrale di 500, 1000 e 2000 Hz, poiché la risposta temporale dell'orecchio alle basse frequenze (125 e 250 Hz) è trascurabile.

I valori rilevati in ambienti di qualità acustica discreta sono tipicamente compresi fra -2 e $+2$ dB.

2.3.4 Early Energy fraction o indice di definizione (D)

L'indice di definizione costituisce una misura della chiarezza con la quale l'ascoltatore recepisce il messaggio parlato.

L'indice D è definito come il rapporto fra l'energia ricevuta nei primi 50 ms e l'energia totale.

$$D = \frac{\int_0^{0.05} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

dove $p(t)$ è la pressione acustica istantanea nel punto di ascolto.

Con $t = 0$ si intende l'istante in cui il segnale diretto raggiunge il ricevitore.

Il limite di integrazione al numeratore di 50 ms. deriva da considerazioni di carattere psicoacustico, infatti l'intervallo di tempo di integrazione dell'orecchio è più breve per il parlato che per la musica. L'Early Energy fraction ha il pregio di essere concettualmente semplice e facilmente rilevabile. Per definizione è compreso fra 0 e 1: i valori superiori a 0.5 sono considerati soddisfacenti.

2.3.5 Centre Time (Ts)

L'Early-to-late Sound Index come pure l'Early Energy fraction si basano sull'ipotesi che tutta l'energia sonora ricevuta entro un predeterminato intervallo di tempo dall'arrivo del suono diretto è utile all'ascolto e che tutta l'energia che giunge successivamente è invece dannosa.

Tuttavia l'apparato uditivo umano non opera un taglio uditivo così netto.

Il tempo centrale o tempo baricentrico rappresenta un tentativo di aggirare questo ostacolo: analiticamente, esso è costituito dall'ascissa del baricentro dell'area sottesa dell'andamento temporale del quadrato della pressione sonora della risposta all'impulso dell'ambiente, in altre parole è il tempo, in millisecondi, che l'ascoltatore impiega per ricevere l'esatta metà dell'energia acustica totale:

$$t_s = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad [\text{ms}]$$

dove $p(t)$ è la pressione acustica istantanea nel punto di ascolto. Con $t = 0$ si intende l'istante in cui il segnale diretto raggiunge il ricevitore. Anche questo indice costituisce una misura della chiarezza del suono per l'ascoltatore: più basso è il suo valore, più il suono risulta chiaro.

Il valore di t_s , nelle frequenze tra 250 e 2000 Hz, tipicamente risulta tra 140 e 180 ms.

2.4 CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA DI GRANDI AMBIENTI

Nei successivi paragrafi viene descritto il progetto di trattamento acustico del nuovo Teatro di Sori; il progetto acustico ha previsto la modellizzazione dell'ambiente per lo studio acustico della sala. L'utilizzo di *Ramsete* ha consentito sia lo studio dei tempi di riverberazione e dei parametri acustici oggettivi idonei alla sala; inoltre, è stato possibile simulare l'auralizzazione dello spazio.

2.4.1 Modellizzazione acustica

L'analisi della modalità di propagazione delle onde sonore all'interno degli spazi chiusi e la previsione dell'impatto prodotto dal rumore in ambiente esterno, oltre a basarsi sull'applicazione di tecniche sperimentali, comprese la realizzazione di modelli in scala, trovano un potente ausilio progettuale in modelli di simulazione informatici.

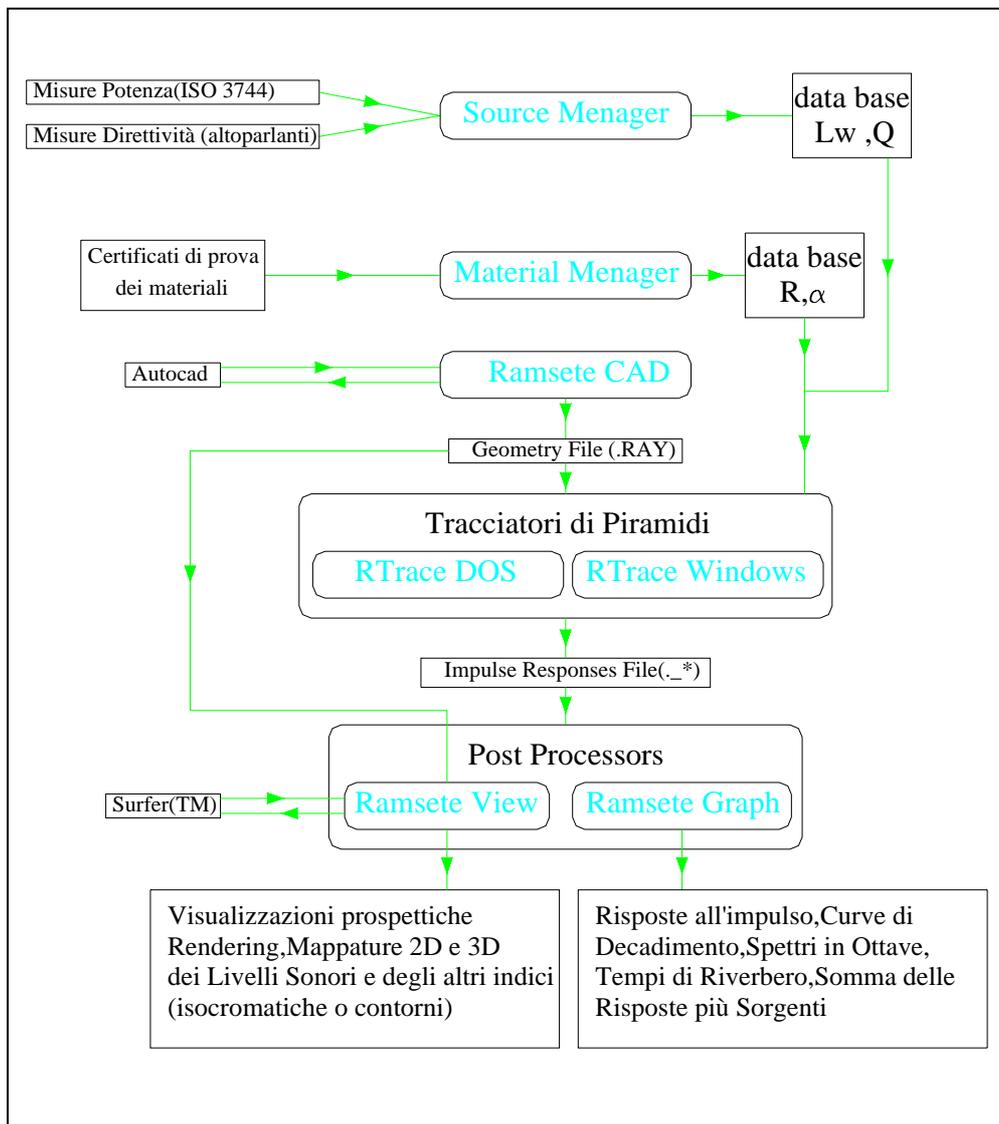
Un impulso, in questa direzione, è offerto dallo sviluppo delle tecnologie informatiche che rendono possibile l'acquisizione di strumenti di simulazione al computer nel campo acustico, non solamente per un ristretto ambito di sperimentatori, ma anche per il progettista edile, dal momento che sono presenti sul mercato programmi semplici da utilizzare ed economicamente accessibili.

A titolo di esempio si presenteranno alcuni risultati ottenuti con il codice di simulazione acustica *Ramsete*. Le caratteristiche di questo software ne fanno uno strumento adatto sia allo studio di sale da concerto, auditori e teatri, sia allo studio dei trattamenti acustici in campo industriale, sia allo studio dell'impatto ambientale di sorgenti di rumore all'esterno. È realizzato in modo modulare per facilitare aggiornamenti futuri.

Caratteristiche

L'applicazione è stata progettata in ambiente Windows; ciò permette l'utilizzo di un'interfaccia utente di alto livello, un rapido apprendimento, un facile utilizzo e una completa integrazione con l'ambiente di lavoro più diffuso su PC.

L'intero sistema di previsione del campo sonoro *Ramsete* risulta composto di diversi moduli, resi interdipendenti dall'ambiente multitasking di Microsoft Windows.



Schema a blocchi di *Ramsete*.

L'architettura del sistema è costituita da moduli aventi una specifica funzione, come di seguito specificato. In primo luogo, un CAD tridimensionale, denominato *Ramsete Cad*, permette la costruzione di geometrie tridimensionali; *Ramsete Cad* offre anche la possibilità, attraverso *Ramsete View*, di importare e salvare i file anche in formato .DXF (il formato di autocad).

Il pacchetto è dotato di **due programmi**, *Material Manager* e *Source Manager*, entrambi forniti di un data base interno modificabile dall'utente, uno contenente i coefficienti di assorbimento (α) e il potere fonoisolante (R) di numerosi materiali edilizi per la bande di frequenza comprese tra 31.5 e 16000 Hz, l'altro contenente le caratteristiche delle casse acustiche eventualmente utilizzabili come sorgenti.

Entrambi i programmi permettono di creare **nuove entità**: il primo permette di immettere nuovi materiali definiti dai loro coefficienti acustici, mentre il secondo permette di creare nuovi altoparlanti (sia acquisendo i dati da misure sperimentali sia creandoli automaticamente in modo

sintetico, partendo dai dati analitici ed elettrici) o nuove sorgenti di rumore (anche in questo caso in due modi: sia acquisendo i dati da misure sperimentali secondo le norme ISO 3744, sia in modo automatico fornendo dati sulla potenza e sulla direttività banda per banda).

Inoltre, permette di visualizzare i diagrammi polari (rappresentazione 2D) ed i *ballon* di direttività (rappresentazione 3D) delle sorgenti sonore usate per ogni banda.

Il cuore del pacchetto è il modulo di calcolo; **Ramsete Trace**, che partendo da un file creato con Ramsete Cad fornisce, in uscita, i dati delle risposte all'impulso che potranno essere elaborati dai programmi appositi; il programma è basato sulla tecnica del *pyramid trace* e dell'acustica geometrica.

Sulla base dei file elaborati da Ramsete Trace, il modulo **Ramsete Graph** visualizza in forma grafica una serie di parametri determinanti per la progettazione acustica di un ambiente; i parametri più significativi sono i seguenti: i livelli SPL (sound pressure level), la curva di decadimento di Schroeder e il tempo di riverberazione EDT, T_{15} , T_{20} etc.

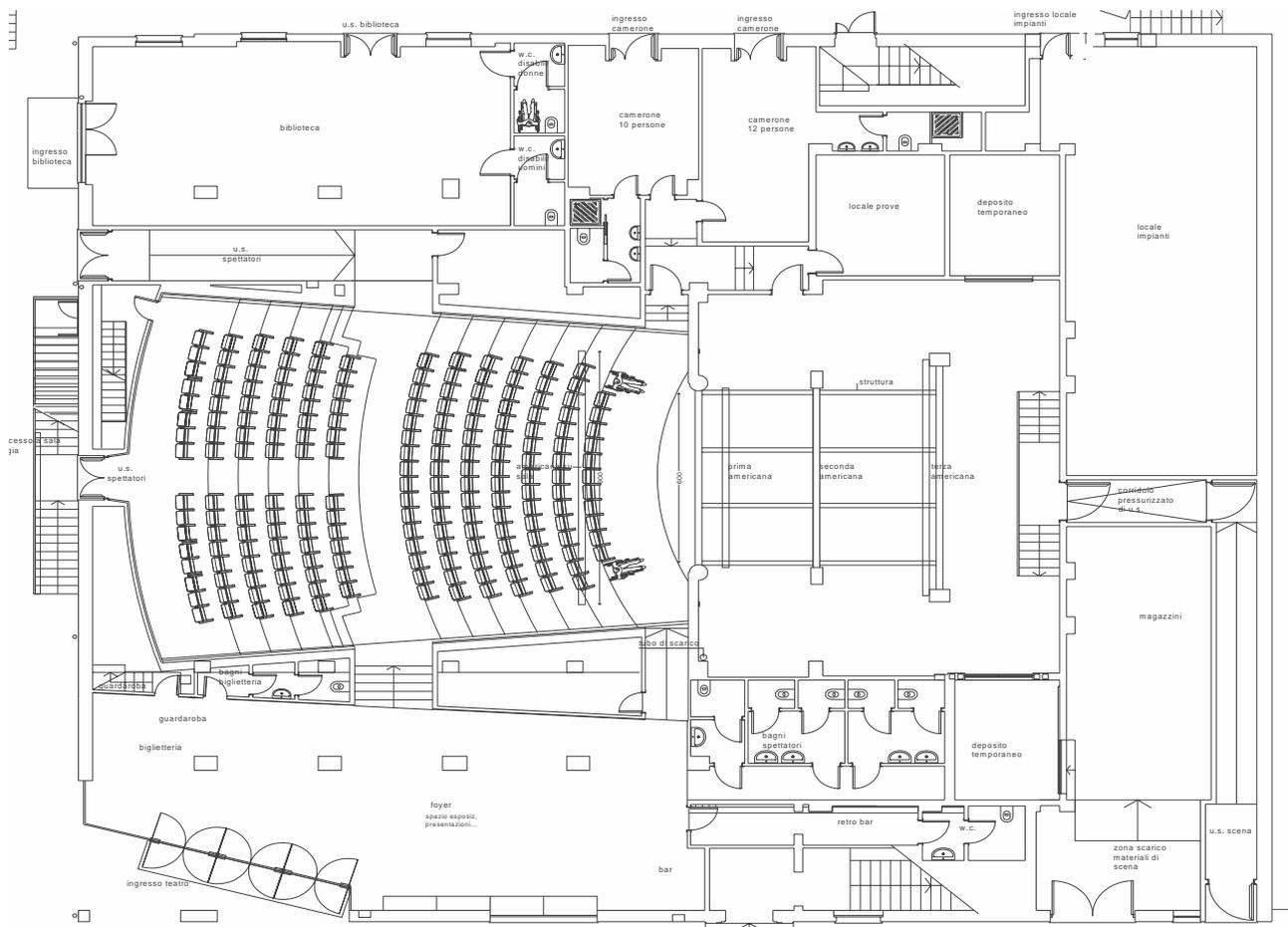
L'ultimo programma del pacchetto è **Ramsete View** che permette di visualizzare prospetticamente una geometria introdotta con *Ramsete Cad* o con *Autocad* e di farne il *rendering*, di mappare i risultati ottenuti con *Ramsete Graph* (in due o tre dimensioni) e di calcolare e mappare (ancora in due o tre dimensioni) i seguenti parametri:

1. **SPL** Livello di pressione sonora;
2. **L_{dir}** Livello dell'onda diretta;
3. **L_{riv}** Livello dell'onda riverberato;
4. **C₈₀** Indice di chiarezza;
5. **STI** Speech transmission index;
6. **ITDG** Initial time decay gap.

2.5 APPLICAZIONE AL TEATRO DI SORI.

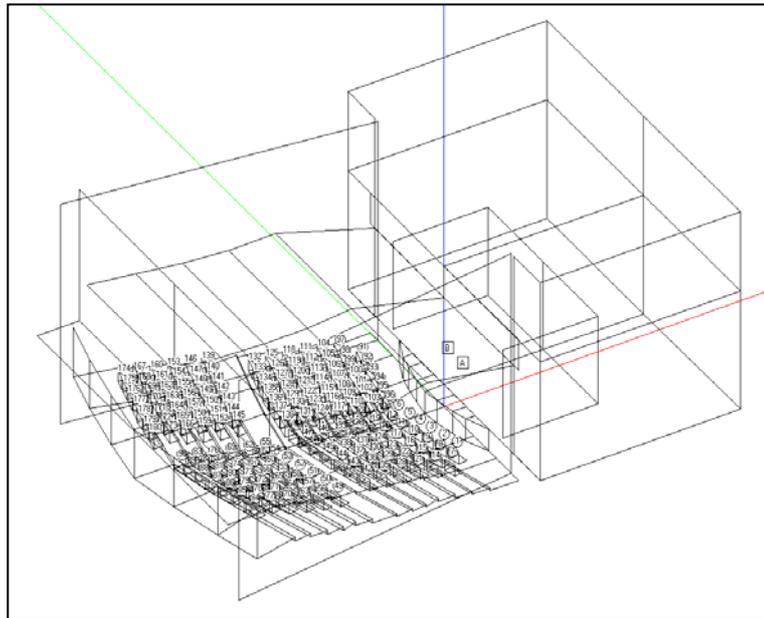
Nella seguenti figure è schematizzato il progetto architettonico della sala; con l'ausilio di *Ramsete Cad* è stato creato il modello geometrico visualizzato di seguito.

Il progetto architettonico prevede la realizzazione di una sala di circa 1450 mc ed una superficie in pianta di 270 mq. Il progetto acustico ha previsto la sagomatura di un controsoffitti di finitura fonoassorbente e la scelta di tutti i materiali di finitura della sala (pareti laterali, pavimento e poltrone) aventi un idoneo fattore di assorbimento acustico in funzione della destinazione d'uso della sala.



Pianta della sala.

A seguito del reperimento di tutte le caratteristiche tecniche ed acustiche dei materiali e della scelta della forma definitiva della sala, è stato realizzato il modello geometrico mediante *Ramsete Cad* in cui sono state definite tutte le superfici di finitura della sala ed attribuite le caratteristiche acustiche delle stesse utilizzando i fattori di assorbimento acustico riportati nella tabella di cui sopra.

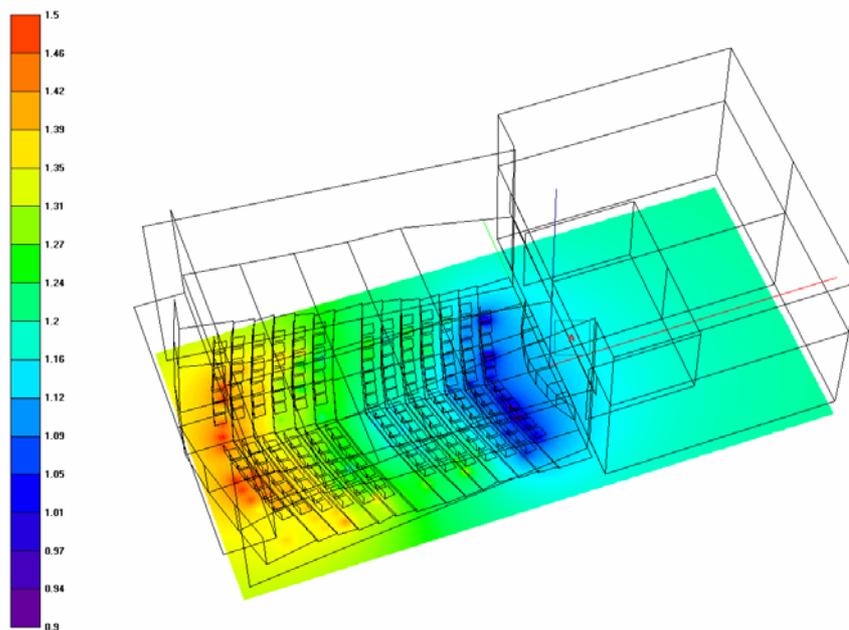


Vista tridimensionale del modello geometrico.

La fase successiva prevede la realizzazione delle simulazioni acustiche con *Ramsete Trace*.

Il software fornisce i seguenti risultati:

1. mappatura “acustica” del tempo di riverberazione (figura seguente);
2. mappatura di altri parametri significativi (ad esempio, tempo di riverberazione, EDT, C_{80} , D).



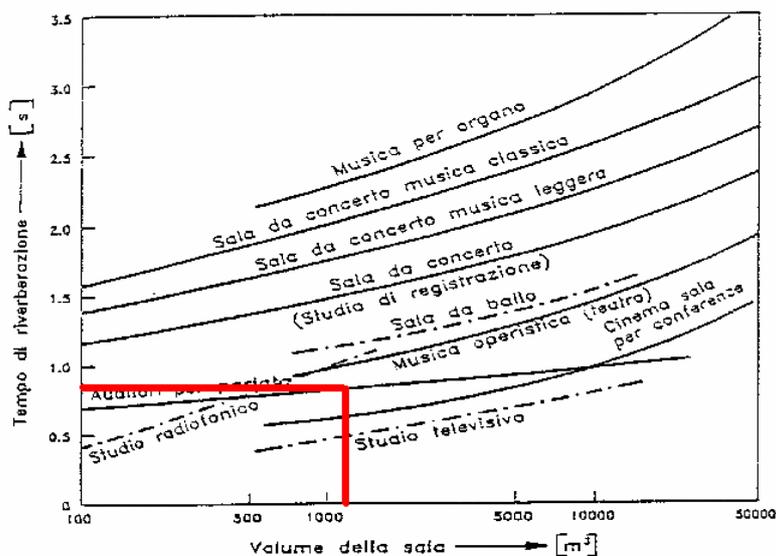
Tempo di riverberazione (T10).

Nella seguente tabella sono riportati i valori dei tempi di riverberazione (T_{10}) medio e per alcuni ricettori posizionati all'interno della sala.

Pos.	Frequenza [Hz]								
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2kHz	4kHz	8kHz	A
Room	2.0	2.0	1.2	0.8	0.5	1.0	1.5	1.3	1.2
1	2.0	2.0	1.0	0.8	0.7	0.8	1.3	1.1	1.0
2	2.0	2.0	1.0	0.8	0.7	0.9	1.3	1.1	1.0
3	2.0	2.0	0.9	0.7	0.7	0.8	1.3	1.0	0.9
4	1.9	1.9	1.0	0.7	0.7	0.9	1.2	1.0	0.9
5	1.9	1.9	1.0	0.7	0.7	0.9	1.3	1.1	1.0
6	1.9	1.9	1.0	0.8	0.7	0.9	1.3	1.1	1.0
7	2.0	2.0	1.0	0.8	0.7	0.9	1.4	1.1	1.0
8	2.0	2.0	1.0	0.8	0.7	0.9	1.3	1.1	1.1
9	2.0	2.0	1.0	0.8	0.7	0.9	1.3	1.1	1.0
10	1.9	1.9	1.0	0.8	0.7	0.9	1.3	1.1	1.1

Tempo di riverberazione (T_{10}).

Come ultima fase si è confrontato il tempo di riverberazione di progetto con quello ottimale di progetto. Con il metodo grafico è stato individuato il valore ottimale del tempo di riverberazione per il teatro; entrando in ascisse nel seguente grafico con il valore del volume della sala (1450 mc) e decidendo l'utilizzo della sala come auditorio per il parlato si è ottenuto un tempo ottimale a 500 Hz pari a 0.7-0.8 secondi. Mediante la curva di adattamento dello spettro sono stati ottenuti anche i valori ottimali del tempo di riverberazione per le altre frequenze significative.



Valori ottimali del Tempo di riverberazione.

Dal confronto con i valori ottenuti mediante l'ausilio di *Ramsete* i valori di progetto risultano idonei alla sala oggetto di intervento.