

---

# ACUSTICA APPLICATA

---

ACUSTICA ARCHITETTONICA – AMBIENTALE – DELLE SALE - RUMORE



**PROF. ING. GIULIANO CAMMARATA**

2016

**FILE: ACUSTICA APPLICATA.DOC**  
**AUTORE: GIULIANO CAMMARATA**  
**DATA: 01/03/2017**

[www.giulianocammarata.it](http://www.giulianocammarata.it)

Il presente volume può essere liberamente copiato e diffuso dagli utenti per uso didattico e a condizione che rimangano invariati i riferimenti sopra indicati.

# INTRODUZIONE ALL'ACUSTICA

L'Acustica Tecnica (nelle varie sue suddivisioni: *Acustica Fisica, Acustica Fisiologica, Acustica Ambientale, Acustica delle Sale, ...*) è disciplina fondamentale. Il comfort acustico è legato ad un organo sensoriale per certi versi meno complesso degli occhi ma per altri versi con problematiche più ampie e meno facili da risolvere di quelle illuminotecniche.

Lo scopo del presente testo è quello di esaminare il comfort acustico, anche in considerazione del numero elevato di norme e leggi che sono state emesse in questo settore negli ultimi dieci anni.

Per l'Acustica è più difficile definire condizioni di comfort: sono, infatti, troppe le variabili psicofisiche ed accessorie rispetto a quelle fisiche ed oggettive per potere pensare di ridurre il problema del comfort acustico ad una equazione (*come ha fatto Fanger per il comfort termico*). Oggi abbiamo ancora il problema di *valutare* (e quindi di esprimere un voto, un giudizio) il *rumore* che, come si vedrà nel prosieguo, è un suono affetto da un giudizio di disturbo o inaccettabilità dell'Uomo. Non esiste un modo sicuro, univoco ed oggettivo per valutare il rumore.

Ricorriamo a complesse procedure che cercano di combinare effetti fisici e reazioni psicofisiche ma riusciamo a farlo solo per determinate condizioni mentali, ad esempio possiamo *valutare* il rumore per gli effetti sul parlato (ossia sull'intelligibilità delle sillabe e dei fonemi) ma non siamo in grado di fare altrettanto per altre attività dell'Uomo.

L'evoluzione delle conoscenze nell'Acustica ha molto condizionato lo sviluppo di questa disciplina, probabilmente più delle altre. Ritengo opportuno fare un brevissimo cenno alla storia dell'Acustica anche per i risvolti che ha avuto, ad esempio, nella storia dell'Architettura dei Teatri.

Nell'età del rame i primi teatri all'aperto erano costruiti, vedi Figura 1, con il solo scopo di consentire la visione della scena e l'ascolto della recitazione. L'esempio del teatro di *Cnosso* ci fa vedere come fosse essenziale la disposizione dei sedili e della stessa scena. La distanza massima fra attore e spettatore era una ventina di metri.

Quando *Aristosseno* enunciò la sua teoria sulla propagazione del suono (*"come le onde in uno stagno ma che si propagano anche verticalmente"*) i greci riuscirono a costruire mirabili teatri all'aperto (vedi il Teatro di *Epidauro*, di *Siracusa*, di *Taormina*, ...) tutt'oggi ammirati per la loro perfetta funzionalità ed ancora utilizzati per le rappresentazioni teatrali.

Le distanze massime raggiunte fra attore e spettatore erano dell'ordine di 70 metri, quasi il doppio del limite di 42 m fissato da *Lyon* nei suoi esperimenti per la determinazione della massima distanza di diffusione del suono all'aperto.

I greci non solo avevano compreso che il suono si propaga, all'aperto, per onde sferiche (l'angolo delle gradinate è tale da far intercettare le onde dirette e la loro disposizione è a semicerchio) ma anche che la riflessione del muro di scena e della piattaforma antistante il palco rafforza l'intensità acustica e quindi consente di raddoppiare la distanza massima di trasmissione.

L'esempio dei teatri greci all'aperto è una mirabile sintesi di teoria e di applicazione progettuale: la soluzione trovata era quella che meglio risolveva il problema dell'Acustica dei teatri all'aperto. Ben diversa è stata la situazione per i teatri chiusi.

Non sappiamo se ne siano stati mai costruiti nell'antichità poiché non ne abbiamo alcun ritrovamento archeologico. Molto probabilmente la complessità del fenomeno dell'*Acustica delle Sale* chiuse ha reso inefficaci gli sforzi progettuali per millenni, fino alla metà del settecento quando la famiglia di architetti dei *Galli Babierna* sperimentò una forma teatrale chiusa (Teatro di S. Michele a Venezia, oggi scomparso) che, parafrasando la forma delle campane, consentiva di ottenere buoni risultati. Quella è stata la prima forma dei teatri detti *all'Italiana* destinati alla rappresentazione di opere liriche.



Figura 1: Teatro del Palazzo di Cnosso, Creta: La forma è solo funzionale alla visione

Fino all'inizio del novecento i teatri erano opere *casuali*: essi erano plagiati da forme teatrali esistenti delle quali si conosceva il buon funzionamento oppure venivano innovati nella forma, costruiti, provati e demoliti se non rispondevano alle esigenze funzionali per le quali erano costruiti.

La storia dei teatri<sup>1</sup> europei ci insegna come questa ricerca della forma acustica perfetta sia stata lunga e costosa.

Per millenni l'Uomo, quindi, non è riuscito a controllare il fenomeno della trasmissione del suono in ambienti confinati: troppo complesso il fenomeno per potere essere compreso e definito.

Si è dovuto aspettare che W.C. Sabine enunciassse la sua teoria sulla *riverberazione acustica* all'interno delle sale e che fornisse la prima relazione scientifica sul *tempo di riverberazione* per potere iniziare a capire come vanno le cose e a costruire, coscientemente, i primi teatri.

Spesso si ricorreva all'utilizzo di metafore per cercare di risolvere il problema dei teatri, come detto per il Teatro a forma di campana (vedi i Galli Babiena nel '700), perché si riconosceva a questa forma una buona musicalità. Chi non si accorge che i teatri lirici sembrano tutti gli stessi ad eccezione dei fregi artistici, degli ordini dei palchi, .... Sono tutti a forma di *doppio ellisse* come il primo teatro di Venezia. Ma non si vuole qui limitare l'interesse all'Acustica solo per le Sale Teatrali. Oggi il campo di interesse si è enormemente allargato alle applicazioni fisiche industriali (*analisi non distruttive*), mediche (*ecografia*), geologiche (*prospezioni terrestri*), marine (*ecografia subacquea*).



Figura 2: Teatro di Epidauro: La forma è funzionale all'Acustica del Teatro

---

<sup>1</sup> Vedi **Michael Forsyth**: *Edifici per la Musica*, Edizione Zanichelli (1991)

Ma di grande interesse sono anche le problematiche dell'Acustica Ambientale, cioè dell'Acustica che si occupa della propagazione del suono in ambienti esterni e alle problematiche connesse al rumore, in particolare alla valutazione del rischio uditivo ai sensi del D. Lgs 277/91, D. Lgs 626/94, D.Lgs 494/96 e successivi decreti. Finalmente anche in Italia (*dopo oltre 130 anni dall'unità* per il primo DPR) stiamo acquisendo la cultura del benessere fisiologico (qui, in particolare, di quello acustico) e nell'ultimo decennio sono state emanate numerose leggi e decreti per regolamentare i problemi del rumore.

Dato l'interesse professionale dell'Acustica Ambientale se ne darà ampio riscontro nei prossimi capitoli. Si farà anche riferimento ai problemi della rumorosità da traffico veicolare, ai sistemi di valutazione e di protezione dal rumore. Forse fra tutti gli intorni fisici (*termico, illuminotecnico, igrometrico, acustico*) quello acustico è ancora il più complesso e ancora lontano dall'essere pienamente definito.

Nei prossimi capitoli si vedranno i fattori ambientali che definiscono gli indici di benessere acustico, se ne studieranno le procedure di definizione, le normative e la legislazione vigente.

Alcuni concetti di base verranno brevemente introdotti nella stessa trattazione per maggiore completezza espositiva.

Si consideri, ancora, che nell'ultimo decennio si è avuto un notevole impulso (forse eccessivo) alla normativa per il controllo del rumore negli ambienti di lavoro.

Anche alla luce della cogenza di alcune norme e dell'importanza che esse assumono nella vita professionale dell'Ingegnere, qualunque sia il suo ruolo, ritengo opportuno presentare le problematiche della sicurezza nei luoghi di lavoro e in particolare per la valutazione del rischio uditivo.

Il quadro di riferimento è ben nutrito e qui di seguito riassunto:

- L. 30/07/1990 n. 12 (*Recepimento delle Direttive europee in materia di protezione dei lavoratori contro i rischi da esposizione ad agenti esterni*) D.Lgs 15/08/1991 n. 277 (*Norme in materia di protezione dei lavoratori contro i rischi da esposizione*)
- L. 19/02/1992 n. 142 (*Recepimento delle Direttive europee in materia di sicurezza dei lavoratori*) D.Lgs del 19/09/1994 n. 626 (*Norme di attuazione in materia di sicurezza dei lavoratori*) e successive modifiche;
- D.Lgs del 14/08/1996 n. 494 (*Norme di attuazione in materia di sicurezza nei cantieri mobili*) e successive modifiche. Direttiva 2003/10/CE del 06/02/03 (*Sulle prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici – rumore*) Si vedranno, quindi, le metodologie di calcolo oggi utilizzate per il calcolo del livello di esposizione personale giornaliero (*metodo analitici e semiempirici*) e si indicheranno alcuni esempi.

Una trattazione completa di tutte le problematiche sopra esposte richiederebbe certamente uno spazio più ampio di quello qui utilizzato.

Pertanto per l'approfondimento dei temi trattati si rinvia alla *bibliografia* riportata alla fine dei capitoli e alle pubblicazioni scientifiche indicate.

Catania 1 marzo 2017

# 1. ACUSTICA TECNICA

L'Acustica è una scienza antica associata alla percezione sensoriale dell'Uomo del suono. Fin dall'antichità i problemi acustici, come quelli dei teatri all'aperto, hanno avuto soluzioni pratiche ancora oggi valide. Non tutto è stato chiaro all'inizio perché il suono è sì percepito con l'udito ma non è stato un fenomeno facilmente compreso e misurato. Non si vuole qui affrontare un corso di Acustica Fisica che già di per sé richiederebbe alcune annualità. In vista dello studio dell'Acustica Applicata si vedranno solamente i concetti di base necessari per le successive applicazioni.

Il suono è generato dalla variazione di pressione che si trasmette in un mezzo materiale (fluido o solido) che si propaga **senza trasporto** di materia.

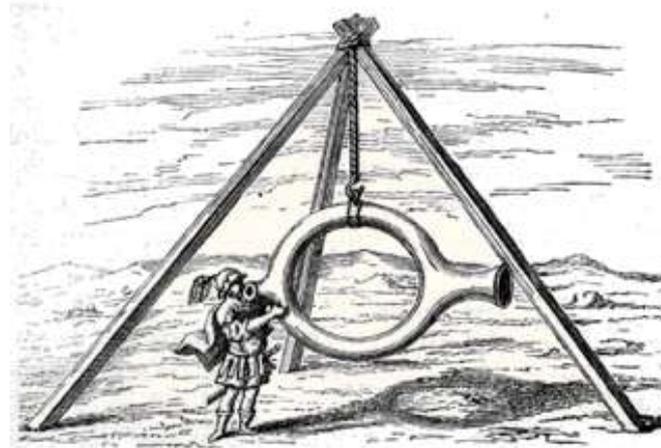
Esso è caratterizzato da alcune grandezze fondamentali quali l'*Ampiezza*, la *frequenza* o il periodo di oscillazione, la *lunghezza d'onda* e la *celerità di propagazione* nel mezzo attraversato.

Il suono è il principale mezzo di comunicazione dell'Uomo e il suo apparato uditivo si è specializzato nel tempo in modo da ottimizzare l'ascolto del linguaggio parlato. A differenza della luce, il suono può essere generato dall'Uomo che, pertanto, oltre che ricettore è anche una sorgente sonora.

Anche il rumore è un suono con caratteristiche fisico - psichiche non gradite: si vedranno nel prosieguo sia la definizione di rumore che le problematiche che esso pone.

Il suono ha utilizzi di vario genere: oltre che per la comunicazione fra esseri viventi esso può essere utilizzato nell'industria, nella medicina, nella geologia, nella medicina, ...

Anticamente veniva utilizzato, dai mongoli, anche per torturare ed uccidere i prigionieri ponendoli all'interno di una campana metallica.



**The horn of Alexander the Great**

Figura 3: Il corno di Alessandro Magno

Si dice che *Alessandro Magno* utilizzasse, prima della battaglia, un grande corno per terrorizzare i suoi nemici.

Nel prosieguo si introdurranno i concetti fondamentali dell'*Acustica Fisica* e dell'*Acustica Fisiologica* necessari per lo studio dell'*Acustica Ambientale* nei vari aspetti (*rumore, trasmissione del suono, protezione dal rumore, rischio uditivo*), dell'*Acustica Fonetica*, dell'*Acustica delle Sale*.

Questo testo non è un riferimento completo di tutte queste problematiche né può esserlo considerato lo spazio limitato a disposizione. Vuole in ogni caso essere uno stimolo per le numerose ad attualissime problematiche che l'*Acustica Tecnica* oggi pone nella vita quotidiana dei cittadini e nel campo professionale.

Il numero e l'importanza delle leggi, decreti e norme tecniche oggi presenti in Italia (*quasi tutte non più vecchi di un ventennio*) rendono le conoscenze dell'*Acustica Tecnica* necessarie per qualsivoglia attività professionale (sia in campo industriale che in campo civile) si eserciti.

Ne sono testimoni i decreti legislativi per la sicurezza nei luoghi di lavoro, nei cantieri, nelle discoteche, ...

Debbo dire che l'*Acustica Tecnica* è disciplina poco studiata in Italia. Non tutte le Università la contemplano nei piani di studio malgrado il notevole interesse professionale.

Oltre a cenni di *Acustica Fisica* e *Fisiologica*, si tratteranno i seguenti argomenti:

- Trasmissione del Suono;
- Effetti del rumore sull'Uomo;
- Il D.P.C.M. 01/03/1991;
- Il D.Lgs, 277/91;
- L. 447/1995;
- Requisiti Acustici agli Edifici;
- Acustica Ambientale;
- Acustica delle Sale;
- Il Linguaggio parlato;
- Controllo del rumore negli impianti.

## 2. CENNI DI ACUSTICA FISICA

L'Acustica Fisica è materia fra le più complesse anche per il consistente apparato matematico necessario. In questa sede si forniscono solamente i concetti necessari per le applicazioni proprie dell'Acustica Tecnica.

### 2.1. ACUSTICA FISICA

Si presentano nei successivi paragrafi alcuni concetti fondamentali di Acustica Fisica e in particolare si richiameranno le leggi fisiche più importanti ed utili per il prosieguo. Si ricorda che l'Acustica Fisica fa parte dei corsi di Fisica Generale e pertanto quanto qui riportato ha solo valore di un semplice richiamo. Sfortunatamente questo argomento, pure importantissimo della Fisica, viene quasi sistematicamente trascurato nei corsi di Fisica Generale e pertanto queste pagine vogliono solo colmare, in modo sintetico, questa lacuna formativa.

### 2.2. LA CELERITÀ DEL SUONO

Nel mezzo di trasmissione l'onda sonora si propaga con una certa velocità detta *celerità del suono* (detta erroneamente anche *velocità*).

Tale grandezza dipende da più fattori, uno dei quali è il materiale del corpo attraverso il quale avviene la propagazione. La velocità di propagazione del suono nell'aria (supposta come gas perfetto) si ricava dalla formula:

$$v_s = \sqrt{\frac{k}{\rho} p} \quad [1]$$

- $p$  = pressione
- $k$  = modulo di compressibilità adiabatica dell'aria
- $\rho$  = massa specifica

Così pur essendo indipendente dalla frequenza e dall'umidità, la velocità del suono nell'aria è dipendente dalla temperatura: ad una temperatura di 20°C la velocità è di circa 344 m/s; ad ogni aumento di 1°C della temperatura, corrisponde un incremento nella velocità di 0,61 m/s.

Nel caso di mezzi di trasmissione liquidi, la velocità si ottiene mediante la formula:

$$c = \sqrt{\frac{k}{\rho}} \quad [2]$$

- $k$  = modulo di compressibilità adiabatica
- $\rho$  = densità del liquido

Nei solidi:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad [3]$$

- $E$  = modulo di elasticità del solido

In generale si dimostra in *Termodinamica* che per piccole perturbazioni (quali si hanno nei suoni normali) vale la relazione:

$$c = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s} \quad [4]$$

Ossia, la *celerità del suono* è legata alla radice quadrata della variazione della densità rispetto alla pressione ad entropia costante. Per un gas perfetto si può anche scrivere:

$$c = \sqrt{kRT} \quad [5]$$

con  $k$  costante di adiabacità ( $c_p/c_v$ ) del mezzo di trasmissione ( $k=1.4$  per l'aria),  $T$  la temperatura assoluta del mezzo (in gradi Kelvin) ed  $R$  la costante del gas ( $R=R^*/M$ ) rapporto fra la costante universale dei gas ed il peso molecolare.

Dall'osservazione di queste formule si deduce che il suono si propaga più velocemente nei solidi che nell'aria; nel mattone ad esempio è undici volte maggiore di quella dell'aria.

Mezzo di trasmissione	c (m/s)
Aria (secca, 15° C)	341
Acqua di mare	1460
Marmo	3800
Mattoni	3650
Vetro	5000
Ferro	5000
Sughero	500
Gomma elastica	30-70

Tabella 1: Velocità del suono per alcuni mezzi di trasmissione

## 2.3. ONDE PIANE E SFERICHE

Il suono si diffonde seguendo le leggi dei fenomeni ondulatori, come si dirà fra breve.

Si tratta di una sequenza di compressioni e rarefazioni del mezzo di trasmissione che presenta delle zone a densità differenziata; queste rarefazioni non sono ferme ma si spostano nell'aria alla velocità di circa 340 m/s.

A seconda del tipo di sorgente emittente, le onde sonore possono essere *piane*, *cilindriche* o *sferiche*: Nel primo caso i punti di massima rarefazione sono contenuti in piani perpendicolari alla direzione di propagazione; nel secondo caso si ha una sorgente lineare che oscillando nella direzione del proprio asse mediante cilindri concentrici genera onde cilindriche: un esempio è dato dal rumore proveniente dal traffico veicolare o ferroviario.

Nel terzo caso, onde sferiche, si può immaginare che la sorgente sia piccola rispetto alle distanza dal punto di ricezione e pertanto le zone di compressione formano delle sfere concentriche. E' questa un'ipotesi semplificativa che molto spesso viene applicata nei calcoli. Si tratta, si intuisce, di una approssimazione valida solo quando le dimensioni della sorgente sono piccole rispetto alla distanza.

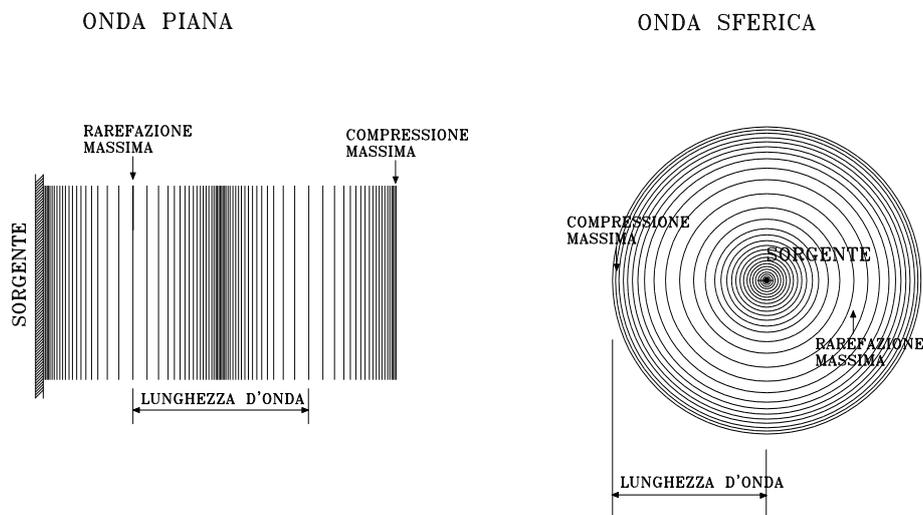


Figura 4: Esempi di onda sonora piana e sferica

Spesso i problemi di trasmissione delle onde acustiche sono più complessi di quanto ci si lasci immaginare. Nella Figura 5 si ha un esempio di fronte d'onda che inizialmente è sferico (viene rappresentata una sezione in piano) e poi, al crescere della distanza dalla sorgente, il fronte d'onda diviene piano.

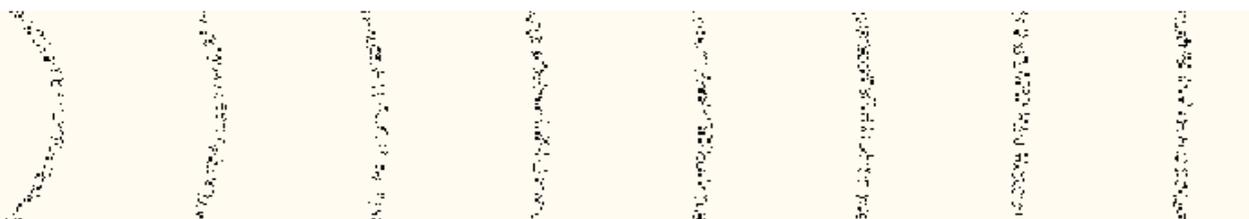


Figura 5: Esempio di propagazione di onde acustiche: inizialmente sferiche e poi piane a grandi distanze

Pertanto l'ipotesi da seguire nelle applicazioni deve essere attentamente valutata caso per caso onde evitare possibili errori finali. Vedremo nel prosieguo quali implicazioni si ha l'ipotesi di fronte sferico o di fronte cilindrico nell'attenuazione dell'intensità acustica per divergenza.

## 2.4. GRANDEZZE FONDAMENTALI PER L'ACUSTICA

### 2.4.1. LUNGHEZZA D'ONDA E FREQUENZA

I fenomeni ondulatori e quindi anche il suono, vengono descritti mediante grandezze fisiche. Tra le più importanti vi sono la *lunghezza d'onda* e la *frequenza*. La lunghezza d'onda è la distanza che intercorre tra due fronti d'onda aventi la stessa fase ossia, poiché il fenomeno si ripete ciclicamente, tra due zone di massima rarefazione o compressione del mezzo di trasmissione.

La frequenza è per definizione, il numero di volte in cui il fenomeno ondulatorio completo si ripete nell'unità di tempo (secondo) e la sua unità di misura è l'Hertz (Hz). Queste grandezze sono legate tra loro dalla formula:

$$\lambda f = c \quad [6]$$

- $\lambda$  = lunghezza d'onda
- $f$  = frequenza (Hertz)
- $c$  = celerità del suono

Se la frequenza è il numero di volte in cui il fenomeno ondulatorio si ripete nell'unità di tempo, il suo inverso sarà il tempo necessario a compiere tale ondulazione completa. Questa grandezza si dice *periodo* e si esprime analiticamente (l'unità di misura è il *secondo*):

$$T = \frac{1}{f} \quad [7]$$

Il diagramma seguente mostra in forma grafica la relazione fra la lunghezza d'onda e la frequenza nel **campo dell'udibile**, cioè fra 20 e 20000 Hz (intervallo di notevole interesse applicativo poiché rappresenta l'intervallo di udibilità dell'Uomo medio<sup>2</sup>).

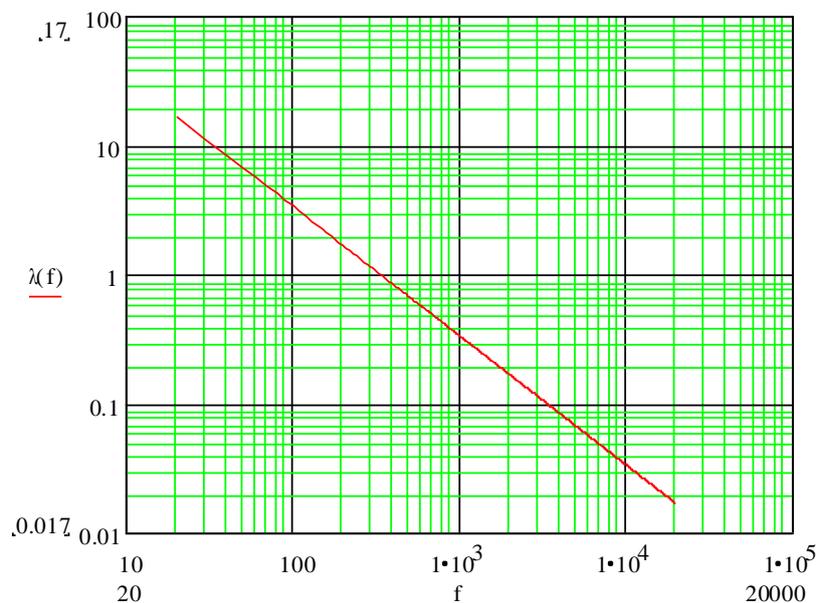


Figura 6: Legame fra lunghezza d'onda e frequenza nel campo dell'udibile

<sup>2</sup> Le applicazioni della Fisica all'Uomo si riferiscono a comportamenti, giudizi, valutazioni, di un **normotipo** individuato dalla risposta media di una platea campioni di uomini e donne, di età compresa fra i 18 e i 33 anni (per evitare problemi di adolescenza e di senilità). E' stato dimostrato che il **normotipo** non è dipendente dal colore della pelle e che, pertanto, ci si può sempre riferire ad un Uomo medio universale.

Si osservi come a 20 Hz, frequenza minima udibile, la lunghezza d'onda corrispondente sia di 17 m mentre a 20.000 Hz è di 17 mm. Queste dimensioni sono importanti nel valutare le interazioni che le onde acustiche hanno con la materia.

Per valori di lunghezza d'onda tale che  $\lambda/4$  sia comparabile con quelle del corpo sul quale il suono incide si ha il fenomeno della *diffrazione* per cui i bordi del corpo divengono essi stessi sorgenti sonore. Con i valori sopra calcolati si ha a 20 Hz una parete di 4 m diffrange il suono. E' quello che avviene, lo si vedrà nel prosieguo, con gli schermi acustici.

Per frequenze oltre 200 Hz si ha  $\lambda/4$  di circa 0,5 m e quindi le pareti si comportano come specchi: si ha *riflessione* e non *diffrazione*. E quindi si possono considerare valide le regole dell'*Acustica Geometrica* basate sulla riflessione geometrica del suono con angoli uguali, ma ribaltati rispetto alla normale, degli angoli di incidenza. Le applicazioni di *Acustica delle Sale* (vedi il Capitolo ad essa dedicata) sono basate, di norma, sull'*Acustica Geometrica* e pertanto si deve tenere conto dei limiti di validità.

Si vedrà ancora che le onde di bassa frequenza interagiscono in modo particolare con la materia e che per la loro attenuazione (vedi note sul *Potere Fonoisolante*) si debbono utilizzare metodologie particolari che sfruttano le risonanze delle cavità o delle lastre.

## 2.4.2. POTENZA SONORA

La *potenza sonora*, detta anche indice di emissione di energia acustica, è l'energia sonora emessa da una sorgente nell'unità di tempo.

Bisogna tuttavia considerare che questa grandezza varia considerevolmente nell'unità di tempo. Per questo motivo si usa distinguerla in potenza *massima* e *media*: la prima è il valore più alto rilevato nell'intervallo di osservazione; la seconda risulta generalmente dal calcolo dei valori medi anche se vi sono diversi metodi per calcolarla.

Questi due valori differiscono tra di loro per diversi ordini di grandezza; un suono che ha una potenza media di 1 *Watt* può presentare potenze istantanee di decine o centinaia di *Watt*; questo fatto è abbastanza rappresentativo dell'importanza di adottare tecniche di misura che siano realmente indicative della potenza sonora sopportata o della sensazione soggettiva che tale potenza comporta.

Potenza	Livello di potenza sonora in dB	Sorgente
100.000.000	200	Motore di missile
10.000	160	Motore di turboreattore
1000	150	
100	140	Aereo leggero da crociera
10	130	
1	120	Motore da 150 CV
0.1	110	Motore elettrico 100 CV, 2600 giri/min.
0.01	100	
0.001	90	
0.0001	80	Aspirapolvere
0.00001	70	Cornamusa
0.000001	60	
0.0000001	50	
0.00000001	40	Discorso bisbigliato

Potenza	Livello di potenza sonora in dB	Sorgente
0.000000001	30	Sfogo d'aria, velocità aria 1 m/s
0.000000001	20	

Tabella 2: Livello di potenza sonora media di varie sorgenti.

Si fa osservare che la potenza acustica è una grandezza assoluta nel senso che la potenza emessa da una sorgente dipende dalla sorgente di emissione mentre il livello di pressione sonora (di cui si parlerà nel prosieguo) dipende da come si trasmette il suono e quindi dipende dalle caratteristiche acustiche e trasmissive dell'ambiente.

In pratica una stessa potenza acustica può dar luogo a diversi livelli di pressione sonora in ambienti diversi. Per analogia si può dire che una stessa lampada che emette la stessa intensità luminosa fornisce valori diversi di illuminamento in ambienti diversi a seconda delle caratteristiche riflesse delle pareti.

### 2.4.3. INTENSITÀ SONORA

Se la potenza è un'energia nell'unità di tempo, l'intensità è un'energia specifica, cioè per unità di superficie. Considerando un'onda sonora che si propaga dalla sorgente, essendo la potenza emanata costante, si nota che tale potenza si distribuisce su superfici sempre più ampie. L'intensità di un suono è quindi il flusso di potenza che passa nell'unità di tempo, attraverso una superficie unitaria e perpendicolare alla direzione di propagazione.

Nel caso di onde sferiche e mezzo di propagazione isotropo ed omogeneo si ha

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad [8]$$

- $I$  = intensità sonora
- $r$  = raggio della sfera

Da questa formula si deduce che l'intensità sonora per una sorgente sferica è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente.

## 2.5. TIPO DI ONDE ACUSTICHE

Si riassumono qui di seguito le relazioni principali per le onde acustiche. Per onde acustiche sferiche l'intensità è inversamente proporzionale al quadrato della distanza, per le onde lineari l'intensità dipende dall'inverso della distanza e per onde acustiche piane l'intensità è indipendente dalla distanza.

Le equazioni delle tre forme di onde possono qui essere scritte con il solito simbolismo:

$$p(r,t) = \frac{A}{r} f(ct \pm r) \quad [9]$$

$$p(r,t) = Af(ct \pm r) \quad [10]$$

$$p(r,t) = \frac{A}{\sqrt{r}} f(ct \pm r) \quad [11]$$

L'equazione delle onde piane nella sua forma più semplice (*suono puro*) è data da:

$$p = p_{\max} * \sin \omega t \quad [12]$$

con  $p_{\max}$  valore massimo della pressione,  $\omega$  la pulsazione  $\omega=2\pi f$ . Si osservi che non si è indicata la fase perché l'orecchio umano è poco sensibile ad essa. Dell'onda sinusoidale sopra indicata si definisce la pressione efficace (o valore quadratico medio, indicato spesso come RMS acronimo di *Root Mean Square*) mediante la relazione:

$$\bar{p} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt} \quad [13]$$

Per un segnale sinusoidale risulta essere:

$$p_{\max} = \rho_0 c \omega A \quad [14]$$

con:

- $A$  valore massimo dello spostamento,  $m$
- $F$  la frequenza,  $Hz$
- $\rho_0$  densità dell'aria,  $kg/m^3$
- $c$  celerità del suono,  $m/s$

Si definisce *densità sonora* l'energia nell'unità di volume,  $J/m^3$ , che, sempre per un'onda sinusoidale, è legata dalla relazione:

$$D = 2\pi^2 f^2 \rho_0 A^2 \quad [15]$$

L'*Intensità acustica*,  $W/m^2$ , è data dalla relazione:

$$I = 2\pi^2 f^2 \rho_0 c A^2 = Dc \quad [16]$$

Inoltre l'intensità è legata alla pressione efficace dalla relazione:

$$I = \frac{\bar{p}^2}{\rho_0 c} \quad [17]$$

con  $\rho_0 c$  impedenza acustica dell'aria (vedi nel prosieguo).

Per onde sinusoidali risulta essere ancora per l'intensità acustica e per la densità (somma dell'energia cinetica e di quella potenziale per unità di volume):

$$I = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} p u d\tau$$

$$D = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} \frac{E_c + E_p}{V} d\tau = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} \left[ \frac{1}{2} \rho_0 u^2 + \frac{p^2}{2\rho_0 c^2} \right] d\tau$$

## 2.6. PROPAGAZIONE DELLE ONDE SONORE

Per lo studio della propagazione delle onde acustiche si hanno le equazioni della *Fluidodinamica* che sono riportate di seguito. Per la conservazione della massa si ha:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad [18]$$

Per la conservazione della quantità di moto si ha:

$$\rho \frac{D\bar{u}}{D\tau} = -\nabla P + \bar{F} + \mu \nabla^2 \bar{u} \quad [19]$$

Quest'ultima si può semplificare supponendo trascurabili le forze esterne e i fenomeni dissipativi viscosi. Si ha, cioè:

$$\rho \frac{D\bar{u}}{D\tau} = -\text{grad}P \quad [20]$$

ove di è fatto uso della *derivata sostanziale* definita dalla relazione:

$$\frac{D}{D\tau} = \frac{\partial}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x}u + \frac{\partial}{\partial y}v + \frac{\partial}{\partial z}w$$

Semplificando i termini si ottengono le due relazioni (conservazione della quantità di moto e della massa semplificate):

$$\begin{aligned} \rho_0 \frac{\partial \bar{u}}{\partial \tau} &= -\text{grad}P \\ \frac{\partial \rho_i}{\partial \tau} + \rho_0 \text{div} \bar{u} &= 0 \end{aligned} \quad [21]$$

Alle equazioni di Navier Stokes [21] si aggiunge anche l'equazione di stato relativa alla trasformazione termodinamica per l'evolversi delle oscillazioni di pressione. Ipotizzando un'assenza di attrito (le variazioni di pressione in campo acustico sono piccole) la trasformazione termodinamica si può assumere *adiabatica* e pertanto si ha:

$$\frac{p}{p_0} = \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^k$$

Ipotizzando variazioni piccole della pressione e della densità:  $p \approx p_0 + \Delta p$ ,  $\rho \approx \rho_0 + \Delta \rho$  allora, trascurando variazioni piccole di ordini superiore, si ha:

$$\frac{p}{p_0} = k \frac{\rho}{\rho_0} \quad [22]$$

Ricordando la definizione di celerità del suono  $c = \sqrt{kp_0 / \rho_0}$  e derivando rispetto al tempo si ottiene:

$$\frac{\partial p}{\partial \tau} = c^2 \frac{\partial \rho}{\partial \tau} \quad [23]$$

Combinando la [23] con le [21] si ottiene, infine, l'equazione:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial \tau} \quad [24]$$

detta equazione di Laplace. Analogamente sviluppando le [21] si ricavano le equazioni:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial \tau^2} \quad [25]$$

e ancora:

$$\nabla^2 \bar{u} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \tau^2} \quad [26]$$

Posto  $\bar{u} = -\text{grad}(P)$  le equazioni [21] si possono scrivere nella forma:

$$\begin{aligned}\rho_0 \frac{\partial \phi}{\partial \tau} &= -p \\ \frac{\partial^2 \phi}{\partial \tau^2} &= c^2 \nabla^2 \phi\end{aligned}\quad [27]$$

L'integrale generale è dato da:

$$\phi = \phi_1 [k(ct - n)] + \phi_2 [k(ct + n)] \quad [28]$$

con  $k$  detto *numero d'onda*  $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ .

L'integrale generale rappresenta la sovrapposizione di due onde, una detta *diretta* ed una detta *inversa*. L'applicazione di condizioni al contorno congruenti spazio-temporali all'equazione delle onde porta a risolvere il problema della propagazione delle onde in un volume di controllo solo in condizioni geometriche particolarmente semplici (prisma, sfera, cilindro) mentre nei casi più generali (e reali) le difficoltà matematiche per determinare una soluzione esatta divengono insormontabili e si deve ricorrere a metodi di integrazione numerica approssimata.

Questo problema interessa, ad esempio, l'*Acustica delle Sale* per la cui soluzione non esistono oggi metodi esatti. Si deve far ricorso a metodi di *ray tracing* o a modelli in scala o a calcoli numerici intensivi agli elementi finiti: in ogni caso la soluzione ottenuta deve essere considerata un compromesso di buon senso e di formalismo matematico.

Per la propagazione delle *onde sferiche*, assumendo variazioni piccole di pressione, dalla [25] si può derivare una relazione nota come *l'equazione delle onde*:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial \tau^2} = c^2 \left[ \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right] \quad [29]$$

che, integrata nel semispazio, fornisce la soluzione generale:

$$p(x, y, z, \tau) = \frac{1}{r} f[ct + r] + \frac{1}{r} g[ct - r] \quad [30]$$

con  $r$  distanza radiale dalla sorgente,  $f$  e  $g$  funzioni arbitrarie (onde dirette e inverse).

Si definisce impedenza specifica il rapporto fra la pressione acustica e la velocità in un dato punto arbitrario dell'onda e cioè si ha:

$$z = rckr \left[ \frac{kr}{1 + k^2 r^2} + i \frac{kr}{1 + k^2 r^2} \right] \quad \text{in Rayl} \quad [31]$$

Per la trasmissione delle *onde piane*, semplificando la [29] alla sola coordinata  $x$ , si ha:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial \tau^2} = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad [32]$$

che, integrata per un semispazio, fornisce un'equazione generale del tutto simile alla [30] ma nella sola  $x$ : Una soluzione particolare si ha ipotizzando le funzioni  $f$  di tipo esponenziale con argomento immaginario. L'onda che si propaga in direzione positiva diviene:

$$p(x, \tau) = p_{\max} e^{jk(ct-x)} = p_{\max} e^{j(\omega t - kx)} \quad [33]$$

con  $p_{\max}$  ampiezza dell'oscillazione,  $k = \omega/c$  [rad/m] il *numero d'onda*. Mediante l'applicazione dei complessi si possono risolvere molti problemi relativi ad onde sinusoidali. Assumendo valida per la rappresentazione fisica la parte reale (o anche il coefficiente dell'immaginario) si ha:

$$p = p_{\max} \sin[k(c\tau - x)] \quad [34]$$

con  $kx$  ritardo o *sfasamento* dell'onda. La velocità è data dalla relazione:

$$u = -\frac{1}{\rho_0} \int \frac{\partial p}{\partial x} d\tau = \frac{kp_{\max}}{\rho_0} \int \cos[k(c\tau - x)] d\tau \quad [35]$$

e quindi si ottiene:

$$u = \frac{kp_{\max}}{\rho_0} \sin[k(c\tau - x)] + B \quad [36]$$

con  $B$  costante da calcolare in base alle condizioni iniziali. Imponendo che per  $x=0$  la  $u$  coincida con la velocità del piano sorgente si ha:

$$u = u_{\max} \sin(\omega\tau - kx) \quad [37]$$

Pertanto le velocità delle particelle sono in fase con la variazione di pressione acustica.

L'impedenza acustica ora diviene:

$$z = \frac{p_{\max}}{u_{\max}} = \rho_0 c \quad [38]$$

Nel caso dell'aria si ha  $\rho_0 c = 412$ . L'intensità acustica si ricava dalla relazione:

$$I = p \cdot u \cos \phi \quad [39]$$

essendo  $p$  ed  $u$  in fase in tutto il campo delle onde piane. Da questa relazione si ottiene la [16].

Si rimanda ai testi specializzati per una trattazione più approfondita di questo argomento.

### 2.6.1. TONI PURI

I suoni reali sono estremamente complessi ma esistono dei modelli semplificativi che ci permettono di comprenderli meglio. Nel caso dei suoni o delle onde sonore in particolare, la forma d'onda reale di un suono qualsiasi è una curva complessa, più o meno periodica, con molte irregolarità e quindi di difficile comprensione.

Esistono tuttavia delle sorgenti che, seppur reali, sono in grado di produrre suoni molto semplici e di facile comprensione detti *toni puri*. Una di queste è il diapason, strumento che emette, se percosso, un suono che si può definire, con buona approssimazione, *puro* e quindi rappresentabile con una semplice sinusoidale.

Se andiamo ad analizzare la forma dell'oscillazione nel tempo del braccio del diapason ci accorgiamo che questa è molto prossima a un'onda sinusoidale che può essere cioè rappresentata matematicamente dalla funzione seno

$$y = A \sin(2\pi f)t \quad [40]$$

- $A$  = ampiezza di vibrazione del braccio
- $f$  = frequenza in Hertz
- $t$  = tempo in secondi

Anche la corrispondente variazione di pressione che si propaga dal diapason sotto forma di onde sonore segue una legge sinusoidale

$$p = p_0 \sin(2\pi f)t \quad [41]$$

- $p_0$  = ampiezza di pressione.

Il moto compiuto da una tale onda è detto *moto armonico semplice*. Se oltre a presentare queste caratteristiche l'onda sonora è composta da una sola frequenza allora si dirà *tono puro*. Il tono puro è l'unità base costituente tutte le onde sonore, dalle più semplici alle più complesse: ogni suono infatti è costituito da uno o più toni puri.

### 2.6.2. LE ARMONICHE

Quando si parla di toni puri si presuppone che la sorgente (l'oggetto che vibra) sia infinitamente rigida ed oscilli con frequenza costante, cosicché l'onda emessa risulti un moto armonico semplice. Un suono di questo tipo può essere ottenuto da un *diapason* di determinata lunghezza d'onda.

Un suono semplice (*monofrequenziale*) si può rappresentare nel piano delle frequenze-ampiezza con una riga centrata alla frequenza  $f$  ed avente un'altezza  $p_0$  pari all'ampiezza dell'onda.

Nella realtà queste condizioni non possono sussistere in quanto non esistono oggetti-sorgente infinitamente rigidi; succede allora che la superficie sviluppa delle vibrazioni supplementari, dette appunto *armoniche*, a frequenze che sono il multiplo di quella principale detta *frequenza fondamentale*; se per esempio la nostra sorgente emette un suono puro a 60Hz, emetterà anche delle armoniche a 120, 180 ... Hz.

Queste frequenze si dicono rispettivamente *prima armonica*, *seconda armonica* e così via. Quanto detto è alla base dello sviluppo in serie di Fourier delle onde acustiche complesse.

### 2.6.3. SUONI COMPLESSI

Come abbiamo già accennato, i rumori<sup>3</sup> o i suoni che percepiamo ogni giorno attraverso l'organo dell'udito, sono ben più complessi dei "*modelli ideali*" di onda descritti sopra. Essi costituiscono la totalità dei suoni percepiti quotidianamente poiché i suoni puri sono solo un'eccezione e direi anche un'astrazione fisica.

Quando si è in presenza di un suono *monofrequenziale* si prova un disturbo notevole, come si dirà nel prosieguo a proposito del DPCM 1/3/91, che le norme vigenti penalizzano.

Tuttavia tali onde mantengono alcune delle caratteristiche dei suoni più semplici, sono cioè *periodiche*, ossia si ripetono uguali a se stesse in maniera ciclica. Hanno inoltre la peculiarità di essere composte da più toni puri sovrapposti. La forma d'onda non sarà più quindi una senoide ma apparirà come una curva frastagliata e ripetitiva. Dalla combinazione casuale di questi suoni semplici nascono le molte varietà di suoni con i quali abbiamo familiarità: la voce umana, il timbro del violino, il rumore di un'auto.

#### Oscillogrammi e spettri sonori

Nei paragrafi precedenti abbiamo parlato del suono come di un effetto risultante dalle innumerevoli vibrazioni di una sorgente. Il movimento vibratorio compiuto da questa si propaga attraverso il mezzo sotto forma di perturbazioni di pressione: le onde sonore.

L'oscillogramma di un suono rappresenta graficamente la relazione tra il tempo e la pressione sonora cosicché, per un suono puro, sarà una semplice oscillazione sinusoidale; per uno

---

<sup>3</sup> Il *rumore*, come già indicato nell'Introduzione, è un suono complesso affetto da un giudizio di indesiderabilità e disturbo da parte di chi lo subisce. Del *rumore* si parlerà più in dettaglio nel prosieguo.

strumento musicale risulterà dalla sovrapposizione degli oscillogrammi delle funzioni sinusoidali semplici del suono fondamentale e delle sue armoniche.

Quando si parla di rumore al posto dell'oscillogramma viene normalmente utilizzato lo spettro sonoro, un grafico che in ascissa riporta la frequenza e in ordinata il livello sonoro. La rappresentazione dello spettro di un suono complesso è data da una serie di righe aventi ciascuna frequenza ed ampiezza ben determinate e il cui numero può essere anche infinito (*suoni impulsivi*). Nella Figura 7 si hanno due rappresentazioni relative ad un suono puro e ad un suono complesso.

### Oscillogramma di un suono puro e di un suono complesso

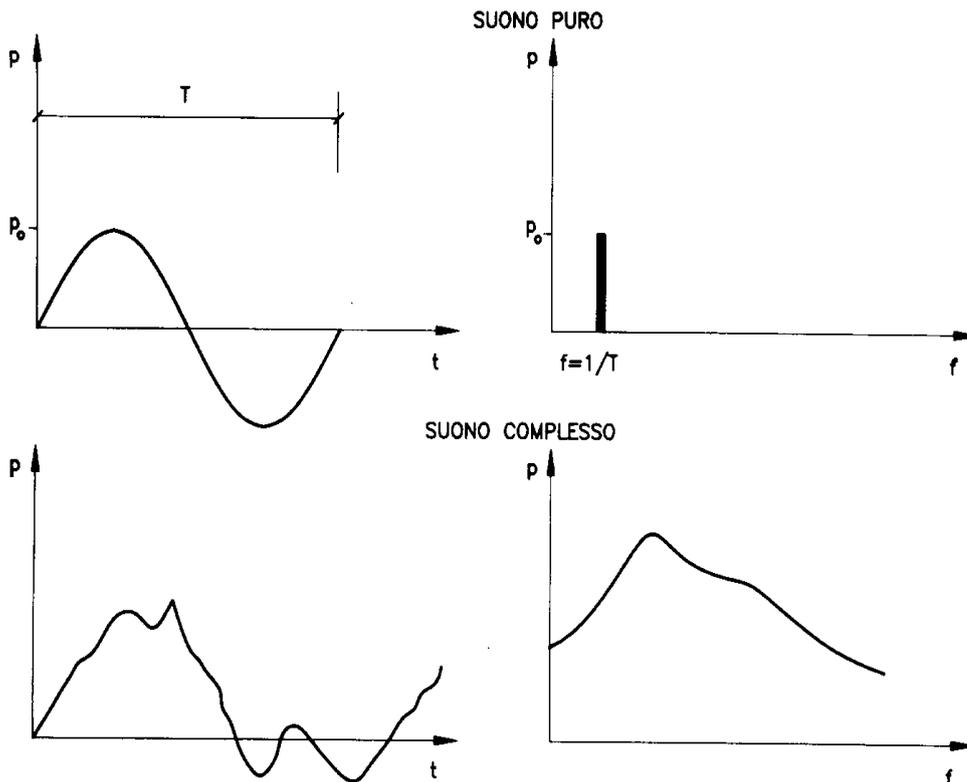


Figura 7 : Rappresentazione spettrale dei suoni.

Nella trattazione del rumore solitamente vengono utilizzati spettri sonori a bande che riuniscono le frequenze acustiche in gruppi cosicché lo spettro anziché essere graficamente formato da linee viene costruito per bande. Usualmente vengono utilizzati spettri sonori a banda d'ottava o a terzi d'ottava.

Le bande di ottava sono definite come intervalli di frequenza tali che il rapporto fra la frequenza massima e la minima sia pari a 2. Per le bande a terzi di ottava le frequenze estreme stanno in rapporto pari a  $\sqrt[3]{2}$ . La frequenza di centro banda è data dalla relazione:

$$f_{cb} = \sqrt{f_1 f_2}$$

Normalmente in una banda di ottava si hanno tre bande a terzi di ottava.

Le frequenze di centro banda per le bande di ottava sono normalizzate e precisamente sono:

**31.5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 16000**

Anche le frequenze a terzi di ottava di centro banda sono normalizzate.

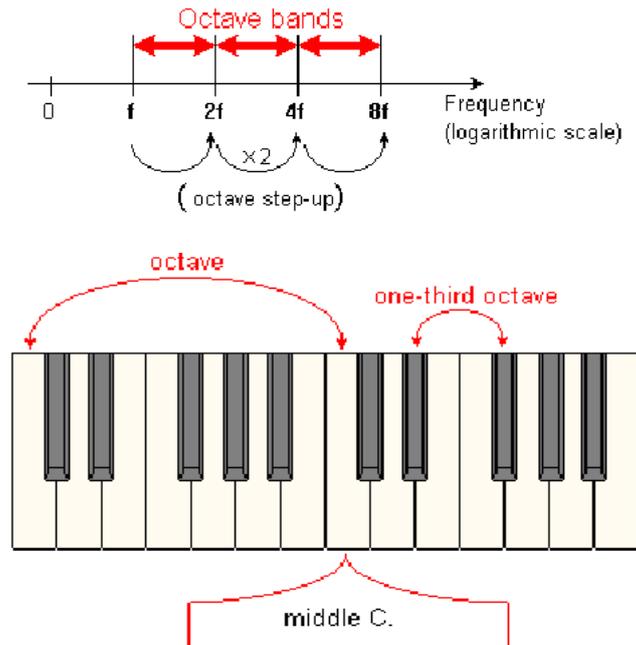


Figura 8: Rappresentazione delle bande acustiche di ottava e terzi di ottava

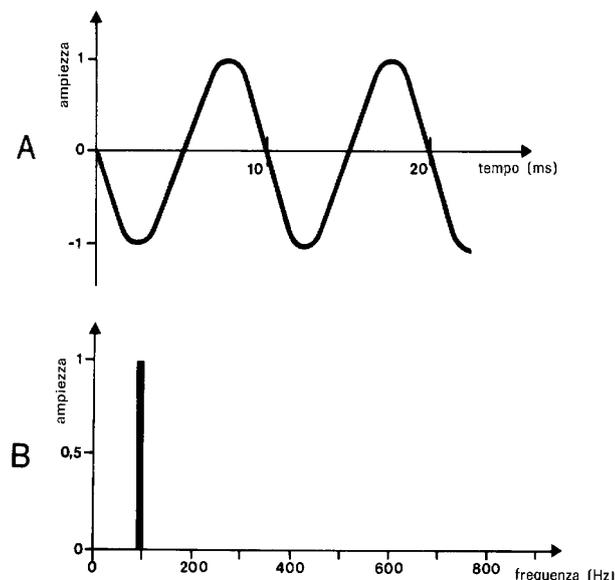


Fig. 13 - Oscillogramma (A) e spettrogramma (B) di un segnale sinusoidale.

Figura 9: Rappresentazione di un suono puro nel piano ampiezza-tempo e nel piano ampiezza-frequenza.

Un'onda sinusoidale é facilmente rappresentabile nel piano ampiezza-tempo. Se caratterizziamo quest'onda con la sua ampiezza e la sua frequenza possiamo rappresentarla nel piano ampiezza-frequenza come riportato dalla figura seguente.

In teoria dei segnali si suole anche considerare la fase: in acustica questa viene trascurata poiché l'orecchio umano non é in grado di discriminarla. Nella Figura 10 si ha un esempio di composizione di tre suoni puri aventi frequenze multiple della fondamentale. Nella Figura 11 si ha la composizione di tre armoniche aventi frequenze multiple, ampiezze variabili e la prima armonica è sfasata nei casi rappresentati a sinistra e a destra della figura.

L'andamento dell'oscillogramma ampiezza-tempo risulta graficamente molto diverso ma per l'udito umano (*scarsamente sensibile alle variazioni di fase*) i due suoni appaiono identici.

La composizione  $p_1(t)+p_2(t)+p_3(t)$  non è di immediata lettura: probabilmente un occhio addestrato saprà individuare la presenza di tre armoniche ma non i rapporti fra loro intercorrenti.

Questo tipo di rappresentazione risulta molto comodo quando si esaminano suoni complessi, cioè formati da più armoniche.

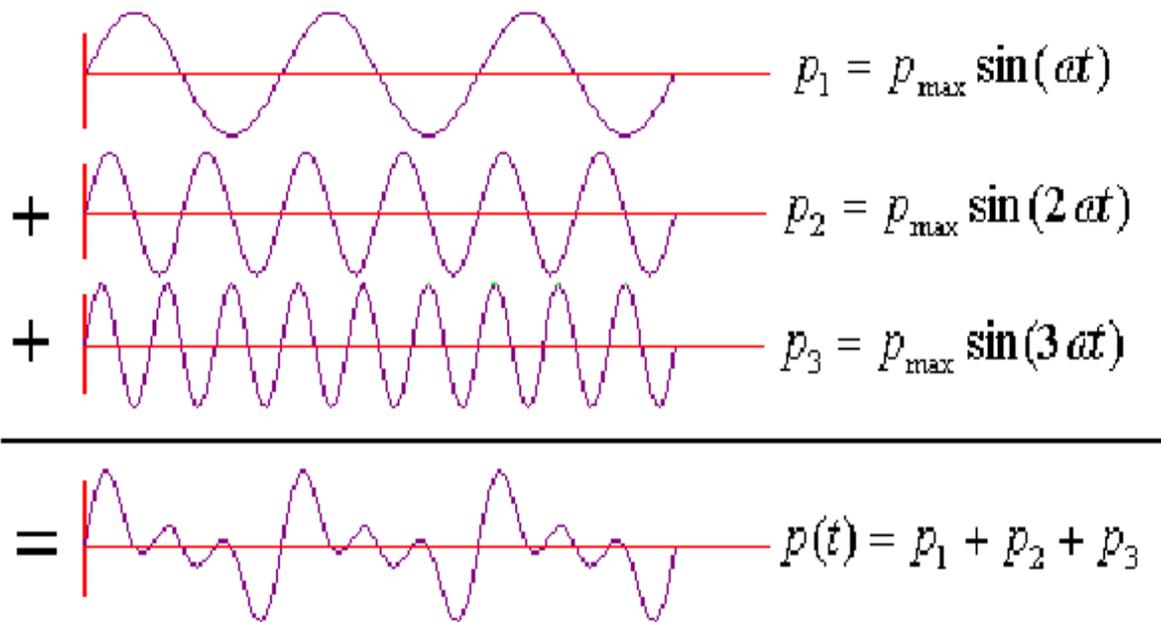


Figura 10: Rappresentazione temporale della somma di tre armoniche

A sinistra e destra della figura si hanno tre armoniche che differiscono solo per la fase della componente fondamentale.

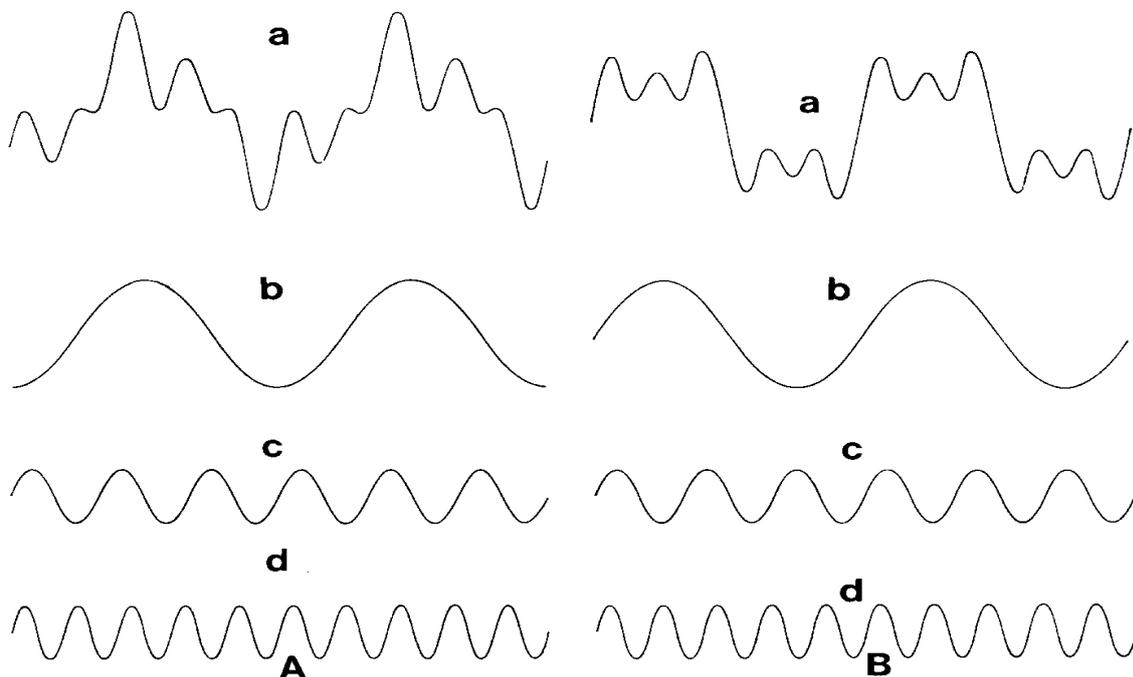


Fig. 19 - Segnali complessi periodici (a), aventi la stessa composizione spettrale (3 armoniche b, c e d) ma differenti nella forma in quanto la 1° armonica (b) in A ha fase diversa che in B.

Figura 11: Composizione di tre armoniche nel piano ampiezza-tempo

Nel piano ampiezza-frequenza si ha l'andamento di Figura 12. Come si può ben osservare le tre componenti sono perfettamente identificabili e la composizione del suono complesso appare chiara già a partire dal primo sguardo.

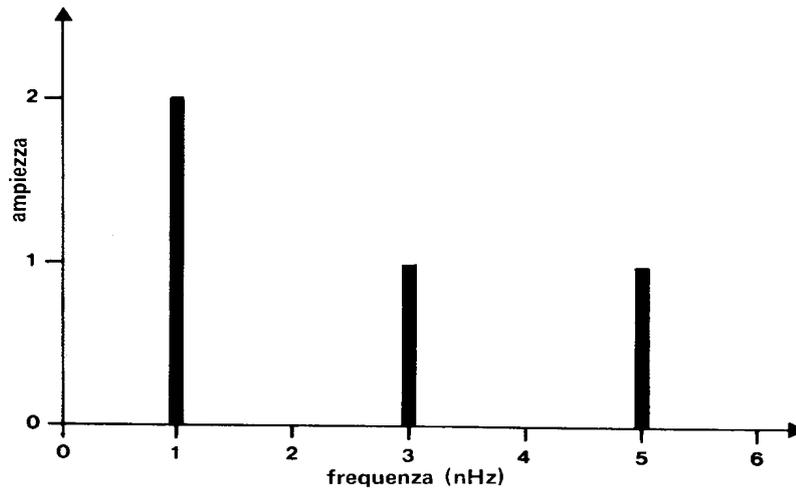


Fig. 20 - Spettro di frequenza dei due segnali (a) di fig. 19.

Figura 12: Composizione di tre armoniche nel piano ampiezza-frequenza.

Per questo motivo l'analisi frequenziale (come viene detta la rappresentazione ampiezza-frequenza) è oggi molto utilizzata per lo studio e l'analisi dei suoni complessi.

L'algoritmo matematico utilizzato è quello della scomposizione in serie di Fourier mediante le seguenti relazioni:

$$f(x) = \frac{A_0}{2} + \left[ \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos(nx) + B_n \sin(nx)) \right] \quad [42]$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \cos(nx) dx \quad [43]$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \sin(nx) dx \quad [44]$$

Le funzioni sinusoidali (o cosinusoidali) sono dette armoniche del segnale dato.

### Trasformazione dello spettro di un segnale

Nelle applicazioni acustiche si utilizzano spesso dispositivi, detti *filtri*, che hanno lo scopo di modificare lo spettro dei segnali e quindi anche la composizione armonica del segnale.

Un segnale filtrato modifica il suo spettro a seconda del tipo di filtro utilizzato, come si può osservare nella figura seguente.

Si osservi che partendo dal segnale iniziale (si tratta di un segnale *glottidico*, cioè prodotto dalla *glottide* umana) lo si trasforma mediante filtri detti, nell'ordine in cui essi compaiono in figura:

- Filtro *passa – basso*. Vengono lasciate passare solo le frequenze inferiori ad una data frequenza di taglio  $f_1$ ;
  - Filtro *passa – alto*: Vengono lasciate passare solo le frequenze maggiori di una data frequenza di taglio  $f_2$ ;
  - Filtro *passa – banda*: Passano solo le frequenze comprese fra due frequenze di taglio  $f_1$  ed  $f_2$ ;
  - Filtro *elimina – banda*: Passano le frequenze esterne ad una data banda di frequenze  $f_1$  ed  $f_2$ ;
- Nella stessa figura si ha, sul lato destro, la ricostruzione del segnale nel dominio del tempo partendo dalle armoniche che passano attraverso il filtro. Si può ben osservare che si ha una differenza sostanziale con il segnale originario.

Pertanto l'azione del filtro è sostanziale in quanto altera sia la composizione del segnale che l'effetto che esso produce con l'ascolto.

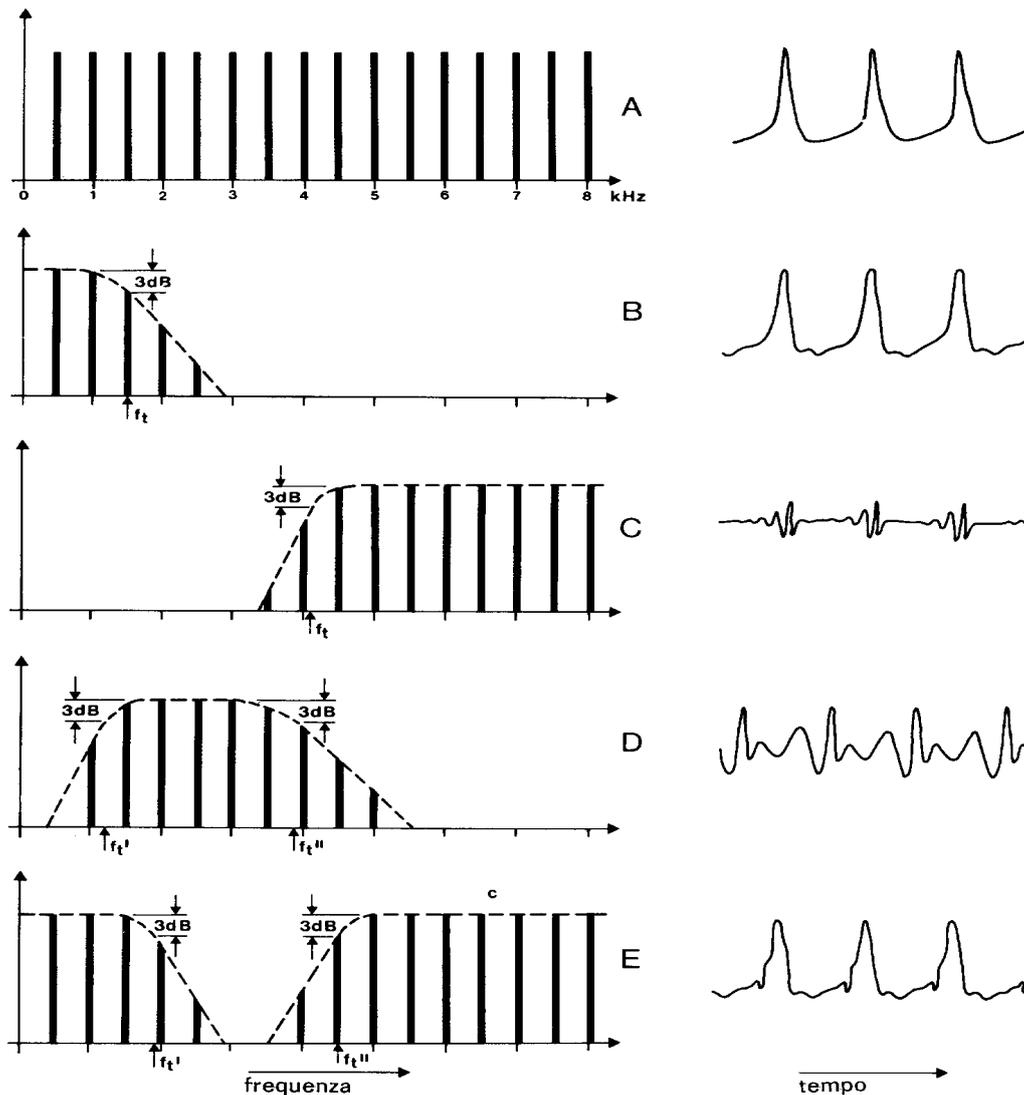


Fig. 22 - Spettrogramma ed oscillogramma di un segnale periodico di tipo impulsivo (A), e loro trasformazioni a seguito di filtraggio reale passa-basso (B), passa-alto (C), passa-banda (D) e elimina-banda (E).

Figura 13: Azione dei filtri sui segnali

In Figura 13 si ha l'esempio, nella prima riga, di un segnale glottidico<sup>4</sup> rappresentato a sinistra dallo spettro e a destra dall'andamento temporale. Applicando i vari filtri indicati nelle righe successive si può vedere come si modifica sia lo spettro (si ha una riduzione di righe e quindi di armoniche) che l'oscillogramma rappresentato alla destra di ogni riga esaminata. Pertanto l'azione di un filtro è quella di modificare la costituzione spettrale dei segnali e la loro apparenza sensoriale all'Uomo.

Vedremo più avanti come anche l'orecchio umano si comporti come un filtro di particolare complessità nella banda passante fra 20 e 20.000 Hz.

<sup>4</sup> Si tratta di una specie di impulso che la *glottide* nella gola emana al momento della richiesta di fonazione da parte dell'Uomo. Questo segnale viene poi modificato (cioè filtrato) dall'esofago, dalla bocca, dalle labbra e dalla lingua per formare il linguaggio parlato.

## 2.7. SPETTRO DI UN SUONO COMPLESSO

Da quando l'informatica e l'elettronica hanno consentito di potere effettuare il calcolo della *Trasformata di Fourier* in tempi tanto brevi o addirittura in *tempo* reale (cioè tali da potere essere considerati istantanei) si é potuto tracciare una particolare rappresentazione di un suono: lo *spettrogramma* o anche *sonogramma*.

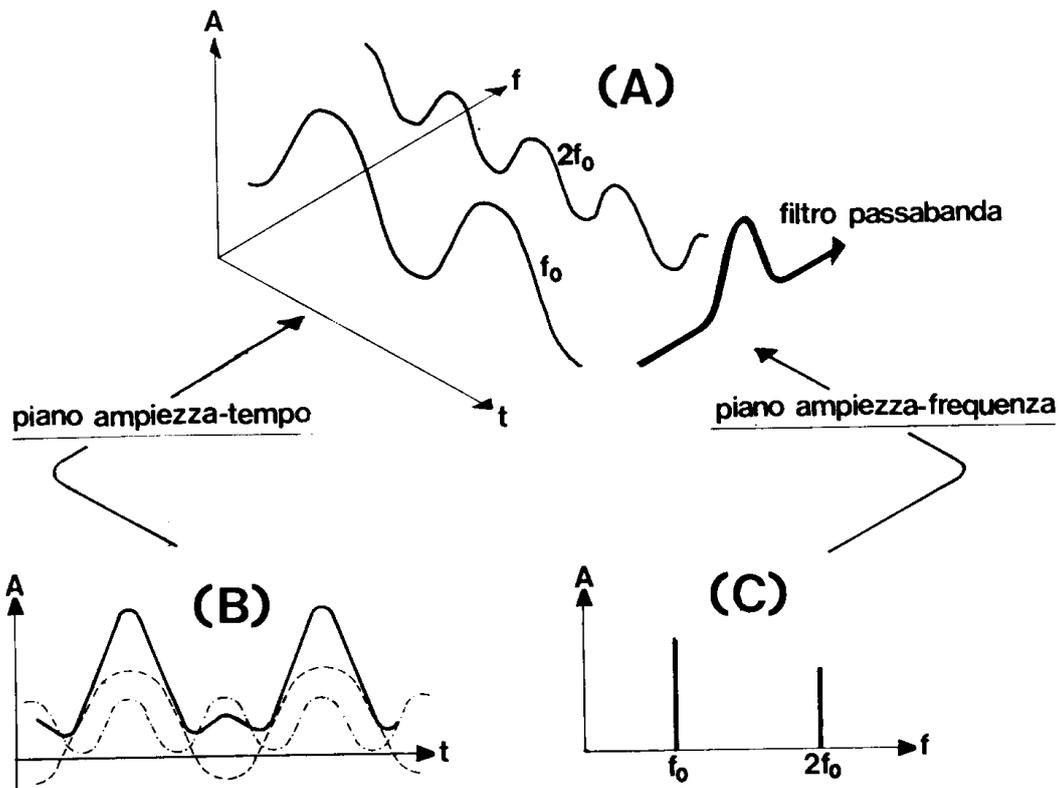


Figura 14: Rappresentazione di un segnale nei vari piani.

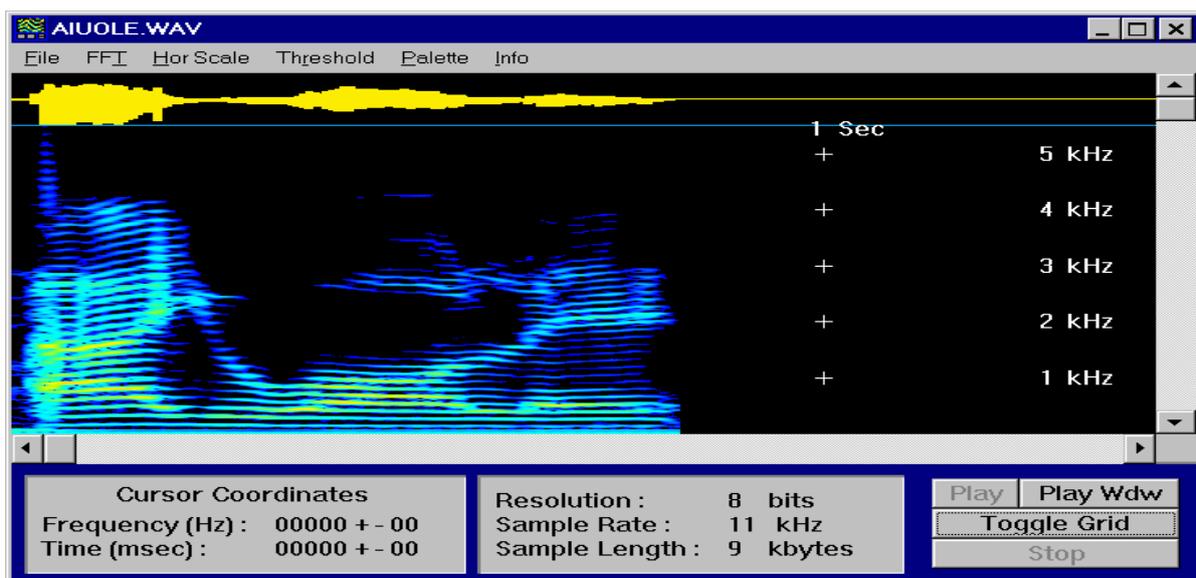


Figura 15- Spettrogramma della parola [AIUOLE].

Esso é in pratica una rappresentazione tridimensionale avente in ascisse il tempo, in ordinate la frequenza e nella terza dimensione l'altezza delle armoniche.

Non potendo rappresentare la terza dimensione su carta é invalso l'uso di indicare l'altezza delle armoniche con gradazioni di colore o di grigio: maggiore é il valore dell'altezza piú nero (se si usa la scala di grigi) o di colore piú vivo (se si usa la scala di colori) é il punto corrispondente.

In Figura 15 si ha la parola rappresentata in forma spettrale.

In Figura 16 é rappresentato l'andamento temporale della stessa parola [AIUOLE] pronunciata da un parlatore.

Le due figure si riferiscono allo stesso brano ma da due punti di vista differenti: la prima fornisce l'andamento bidimensionale del segnale acustico (diagramma ampiezza-tempo detto *oscillogramma*) mentre la seconda fornisce l'andamento tridimensionale frequenza – tempo – ampiezza, detto *spetrogramma*.

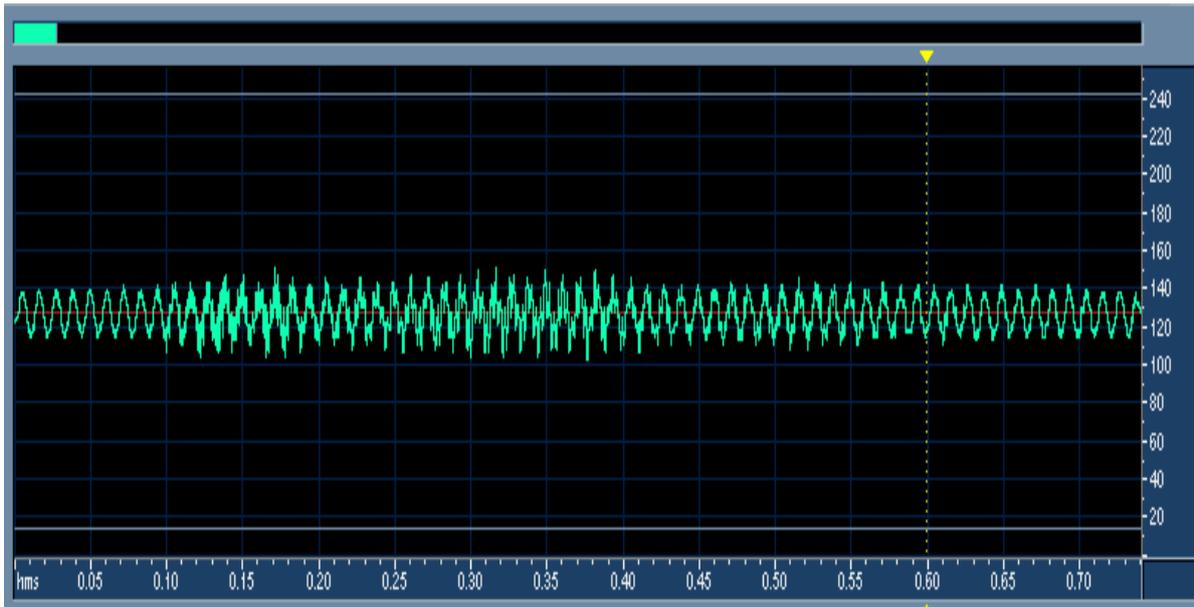


Figura 16- Oscillogramma della parola [Aiuole] pronunciata da un parlatore

Per un suono *complesso* lo spettro, quindi, risulta molto articolato e non può essere rappresentato dalle sole armoniche componenti (di ampiezza variabile e di frequenza crescente e multipla della frequenza minima detta fondamentale) ma occorre rappresentare il suono con riferimento all'intensità contenuta all'interno di bande di frequenze stabilite (a banda stretta di pochi Hz o a banda larga di ottava o a terzi di ottava).

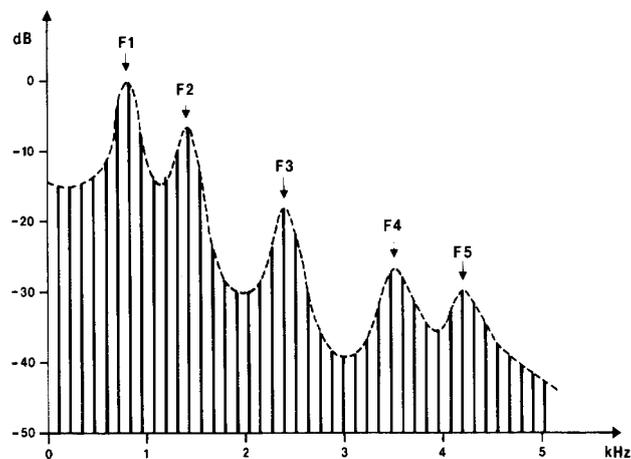


Fig. 14 - Spettro di una vocale [a] con evidenziati l'involucro spettrale (a tratteggio) e le prime cinque formanti.

Figura 17: Rappresentazione spettrale di un suono complesso: la vocale [a].

In pratica si taglia il suono dato a fette di larghezza stabilita, dette *frame*, e si effettua l'analisi spettrale di ciascuna fetta di suono avendo cura di *raccordare* le *frames* mediante particolari funzioni matematiche (*funzioni di Hamming, di Hanning, sinusoidale, ...*), come si dirà fra poco.

In Figura 17 é data la rappresentazione spettrale di una vocale pronunciata da un uomo la cui frequenza fondamentale é di circa 70 Hz.

In Figura 18 é riportata una rappresentazione dell'analisi spettrale di un suono complesso, dittongo [ai] con frequenza fondamentale di 125 Hz, sia a banda stretta che a banda larga.

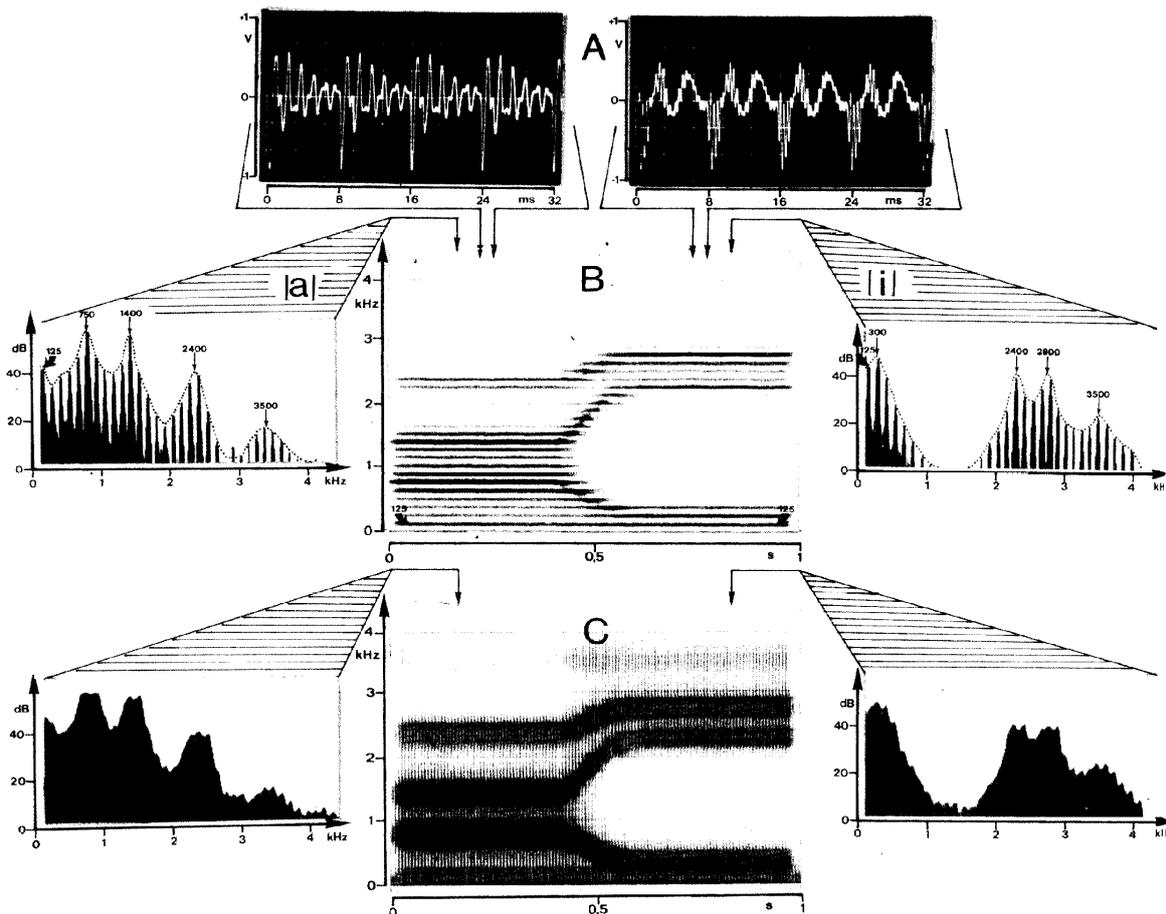


Figura 18: Rappresentazione spettrale convenzionale: sonogramma

Al centro si riporta la sovrapposizione della rappresentazione spaziale con l'ampiezza variabile in funzione del colore (*più nero per maggiore ampiezza*).

### 2.7.1. TRASFORMATA VELOCE DI FOURIER DI UN SEGNALE DIGITALE (FFT)

Lo strumento principale di analisi di un suono complesso è la trasformata di Fourier che oggi può essere anche implementata in modo semplificato mediante un algoritmo basato sulle trasformate di Hadamard detto *Trasformata Veloce di Fourier (FFT)*.

#### Introduzione alla Trasformata di Fourier

Su un segnale acustico l'Analisi di Fourier ci aiuta, come già detto, ad identificare le singole componenti in frequenza. L'Analisi di Fourier si basa sull'omonimo teorema e cioè sulla proprietà di un segnale temporale di poter essere scomposto in una somma di sinusoidi (serie). In generale si può dire che tanto più "complicato" è il segnale temporale, maggiore è il numero di componenti

che lo compongono e ciascuna componente viene identificata mediante la propria ampiezza e la propria fase.

Fase ed ampiezza possono essere descritte come funzioni della frequenza; cioè la trasformata di un segnale temporale.

In altri termini potremmo pensare alla *Trasformata di Fourier* come l'equivalente in frequenza di un segnale temporale; essa contiene le medesime informazioni del segnale temporale tanto che, applicando una *Trasformata Inversa* alla *Trasformata di Fourier* si ottiene nuovamente il segnale nel tempo.

Se non si tiene conto della fase della trasformata tracciando solamente l'ampiezza in funzione della frequenza, si ottiene lo spettro della frequenza (*frequency spectrum*), chiamato anche spettro dell'energia (*energy spectrum*) che non è che una parte del *power spectrum* o spettro di potenza. Solitamente l'ampiezza viene espressa in dB mentre la frequenza in Hz. I picchi dello spettro di potenza identificano le singole componenti.

### Digitalizzazione ed FFT

L'analisi di Fourier è oggi effettuata mediante computer e pertanto si richiede che il segnale venga trasferito opportunamente nella memoria Ram. Quando il calcolatore registra un segnale si serve di una speciale scheda che converte il segnale stesso, da una variazione continua, in una discreta. Durante questa procedura, chiamata *digitalizzazione*, il segnale viene "campionato" ad una certa velocità (tipicamente parecchie migliaia di volte al secondo) ed il *digitalizzatore* assegna ad ogni campione un valore intero a cui corrisponde una determinata tensione. Il valore di tensione ed il valore temporale costituiscono, per il calcolatore, un ben determinato codice con cui esso è in grado di ricostruire il segnale con buona approssimazione.

La sequenza di numeri generata dal convertitore A/D (*Analog to Digital*) riproduce, con buona approssimazione, il segnale continuo. Così come il matematico applica uno sviluppo in serie di Fourier alla formula matematica che approssima il segnale, così si applica un algoritmo simile, la FFT, al segnale digitalizzato, per estrarne il contenuto in frequenza. Tale algoritmo consente di calcolare le singole componenti trattando un numero di punti del segnale presi in potenza di 2 (256, 512, 1024, ... ecc.). Questa tecnica può essere aggirata usando il metodo dello "zero padding" descritto più avanti.

La trasformata di Fourier accetta, in ingresso, un segnale che contiene N campioni e restituisce, in uscita, N/2 valori (linee o canali) di frequenza, in ampiezza e fase. Le componenti in frequenza sono equamente spaziate fra di loro tra 0 Hz e metà della frequenza di campionamento. Aumentando la frequenza di campionamento, aumenta la fedeltà con cui è possibile ricostruire un segnale a scapito della necessità di una maggiore memoria su cui memorizzare i dati.

### Frames, Filtri e FFT di breve durata

Sebbene, in teoria, sia possibile calcolare una FFT su una durata illimitata, la maggior parte delle analisi viene effettuata su periodi (*frames*) abbastanza brevi: un *frame* tipico per le analisi di suoni va da 10 a 50 ms. E' molto importante capire come la lunghezza su cui è calcolata l'FFT influenza il risultato della stessa.

Un principio basilare dell'analisi di Fourier stabilisce che l'analisi nel dominio del tempo è complementare a quella nel dominio della frequenza nel senso che quanto più si conosce della prima, tanto meno è identificata la seconda (indeterminazione tempo-frequenza). In teoria per estrarre tutte le componenti di un segnale occorrerebbe valutarne la trasformata tra  $-\infty$  e  $+\infty$ . D'altro canto, trasformando un segnale finito se ne ottengono le componenti a spese della risoluzione di misura dove per risoluzione (larghezza di banda) si intende la distanza minima calcolata per separare due componenti vicine.

Un altro modo per dare un significato fisico all'FFT è quello di pensare di mandare il vostro segnale ad un banco di  $N$  filtri passabanda ideali, tutti uguali e posti in parallelo, ciascuno dei quali con larghezza di banda predefinita e centrata in maniera da non fare sovrapporre i filtri mettendoli uno accanto all'altro. Un sistema così costruito, idealmente è ovvio, restituisce il segnale separando ogni singola componente del medesimo: se immaginiamo che ogni filtro abbia larghezza di banda 1 Hz ed i filtri siano cento a partire da 1 Hz fino a 100 Hz, il primo filtro restituirà la componente ad 1 Hz, il secondo quella a 2 Hz, il terzo quella a 3 Hz e così via presentando, come risultato del nostro ipotetico schermo, uno spettro di 100 righe.

Il primo importante risultato che otteniamo è la valutazione della quantità di segnale necessaria per ottenere un risultato corretto; abbiamo detto che i filtri sono 100 ciascuno con larghezza di banda 1 Hz. Per il teorema di indeterminazione tempo-frequenza, 1 Hz vuole sostanzialmente dire 1 ciclo al secondo. Dunque per ottenere un risultato corretto, come livello della nostra misura, occorrerà attendere almeno un secondo di segnale affinché i filtri rispondano correttamente.

In caso contrario tanto minore è il tempo di permanenza nel filtro del segnale, tanto più scorretto sarà il valore di ampiezza misurato nel filtro. Nel nostro Analizzatore di Fourier accade la medesima cosa: se vogliamo analizzare un segnale con risoluzione 1 Hz, per avere un risultato corretto, dobbiamo analizzare almeno 1 sec. di segnale. Si osservi però che **il tempo di misura non dipende dalla velocità di campionamento**. Proviamo ad immaginare di portare il nostro fondo scala di analisi ad 1 kHz invece di 100 righe avremo bisogno di 1000 righe di analisi. La velocità di campionamento sarà maggiore, ma sempre 1 secondo di segnale passerà attraverso i nostri ipotetici filtri.

In un analizzatore FFT questo significa un maggior numero di punti analizzati nel tempo, **ma sempre per la medesima quantità di tempo**, a parità di risoluzione considerata.

In genere un analizzatore FFT tratta il segnale temporale in un numero di punti che, per necessità dovute al calcolo binario, è potenza di 2:

Numero di punti	Righe generate in frequenza
64	25
128	50
256	100
512	200
1.024	400
16.384	6.400

Tabella 3: Corrispondenza fra numero di punti e righe di frequenza

Abbiamo detto che, di regola, gli analizzatori di Fourier utilizzano il segnale per punti espressi in potenza di 2 e ciascun punto è un campione generato dal convertitore A/D.

Diremo anche che il campionamento va di passo con il fondo scala in frequenza che si vuole analizzare nel senso che, generalmente, si utilizza come campionamento la così detta frequenza di *Nyquist*, vale a dire 2,56 volte il fondo scala di analisi. Se, ad esempio, si desidera analizzare componenti in frequenza fino a 1 kHz, il segnale verrà campionato a 2,56 kHz, per 10 kHz si userà 25,6 kHz e così di seguito. Un altro importante punto del nostro analizzatore FFT è la finestra di pesatura del segnale. Al contrario di quanto accade per l'analisi di Fourier matematica, l'analizzatore ha a che fare con una dimensione fisica del segnale che, per sua definizione, non può essere infinita.

Ciò dà luogo ai così detti *errori di troncamento* perché il calcolo è effettuato su quello che abbiamo chiamato *frame* il quale ha una durata finita.

Il metodo correntemente usato dagli analizzatori FFT è quello di moltiplicare il segnale per una funzione matematica (*finestra*) fatta in modo da minimizzare tali errori.

Generalmente nei suoni o comunque su segnali non stazionari, si è soliti servirsi di finestre *Hanning* o *Hamming* che hanno la particolarità di ottimizzare il segnale al centro e ridursi a zero ai contorni. Siccome tali finestre hanno una formulazione matematica ben conosciuta, è possibile stimare a priori l'errore introdotto dalla "*pesatura*" e tenerne conto.

L'uso delle varie finestre è abbastanza codificato, a seconda del tipo di segnale che si vuole analizzare e dei risultati che si desidera ottenere e si apprende con la pratica.

In alcuni tipi di analisi si è soliti calcolare molte FFT su tempi brevi affiancandole poi l'una all'altra fino a coprire l'intero segnale (es. una frase o il ciclo di avviamento di un motore) per costruire il cosiddetto *Spettrogramma* o *Sonogramma*.

Ogni singola FFT viene calcolata con la finestra di *Hamming* e l'avanzamento temporale di ogni FFT consecutiva è chiamato *Frame Advance*.

Si può definire la lunghezza del frame su cui è calcolata l'FFT specificando il *Filter Frequency* che è un parametro che richiama il funzionamento dei vecchi Sonografi analogici.

Un filtro stretto, ad esempio 59 Hz si riferisce ad una larghezza di banda più sottile e consente di risolvere frequenze distanti tra loro 59 Hz.

Un filtro più largo, es. 184 Hz, risolve una banda in frequenza più ampia mentre, per contro, migliora la risoluzione temporale (per es. consente di evidenziare gli attacchi della voce).

Siccome la teoria dell'analisi del segnale ci insegna che moltiplicare un segnale temporale per una finestra corrisponde a convolvere lo spettro in frequenza del segnale temporale con l'FFT della finestra stessa, da ciò deriva che esiste una relazione tra la larghezza della finestra (*ms*) e la larghezza della FFT associata (*Hz*), come evidenziato nella tavola seguente:

Larghezza Finestra (ms)	Larghezza Filtro (Hz)
33	45
25	59
10	150
8	184
5	300
3.2	450
2.5	600

Tabella 4: Corrispondenza fra la larghezza della finestra e l'ampiezza del filtro

## 2.7.2. DEFINIZIONI DI BASE

Questo paragrafo descrive alcuni calcoli comunemente usati e richiede una certa dimestichezza con l'analisi matematica.

### La Trasformata veloce di Fourier, FFT

La FFT di N punti discreti, detta anche **DFT** (*Discrete Fourier Transform*), con punti campionati mediante digitalizzazione, è definita dalla relazione:

$$F_k = \sum_{n=0}^{N-1} A_n e^{(-2\pi j)nk/N} \quad [45]$$

per  $k$  variabile da 0 ad  $N-1$ . Si definisce anche la FFT Inversa ad N punti di una sequenza di valori data dalla relazione:

$$A_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F_k e^{(2\pi j)nk/N} \quad [46]$$

Queste funzioni (diretta e inversa) sono oggi facilmente calcolate mediante algoritmi rapidi e compatti che possono essere registrati nella memoria EPROM delle apparecchiature acustiche o eseguiti dai moderni e veloci computer. Si osservi che il numero  $N$  di punti definiscono una durata finita del segnale campionato pari a  $N\Delta t$  con uno spettro discretizzato in  $N/2$  componenti complesse alla distanza di  $f_s/N$  Hertz con  $f_s$  la frequenza di campionamento.

Se il segnale da analizzare è tutto compreso nella finestra di analisi  $N\Delta t$  allora la DFT non introduce errori in caso contrario si ha un effetto di **troncamento** agli estremi della finestra temporale  $N\Delta t$ , come schematizzato in Figura 19 dove si ha nella prima riga la DFT teorica e nella seconda riga la DFT reale con l'errore di troncamento che produce una anomalia nel segnale ricostruito nel dominio del tempo.

### Zero Padding

Il numero di campioni contenuti in un frame deve sempre essere uguale ad una potenza di 2: per garantire si fissa la dimensione della trasformata a  $2^N$  in maniera da renderla uguale o maggiore della dimensione del frame ed ogni punto al di fuori è calcolato come zero. Per ridurre l'effetto di **troncamento** si utilizzano opportune funzioni dette *finestra* che hanno lo scopo di ridurre l'ampiezza del segnale campionato alle estremità della finestra di campionamento. In pratica si moltiplica il segnale per una funzione particolare che riduce gli effetti di discontinuità agli estremi della stessa *finestra* di analisi.

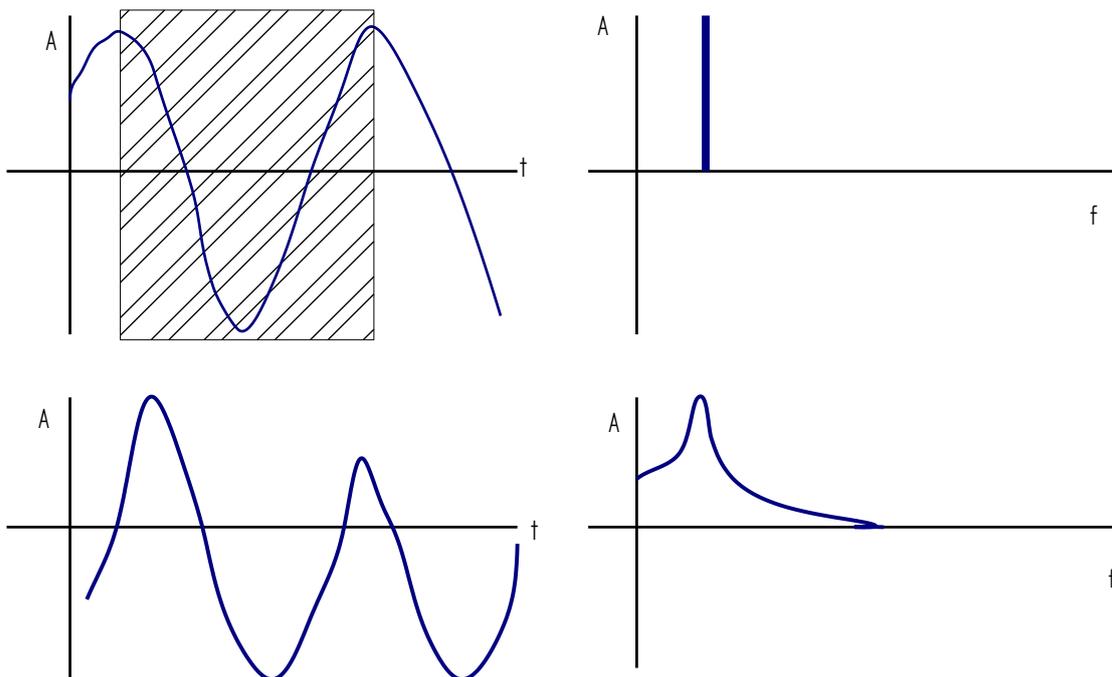


Figura 19: Errore di troncamento dei segnali

Per il teorema di convoluzione si applica la finestra effettuando la convoluzione nel dominio del tempo tra lo spettro del segnale non ponderato e la trasformata di Fourier della *funzione finestra*.

Interessante è la funzione di *Hamming*, vedi Figura 20, definita dalle seguenti relazioni:

$$s(t) = a(t) \cos(\omega t)$$

con:

$$a(t) = 0.54 + 0.46 \cos(2\pi f)$$

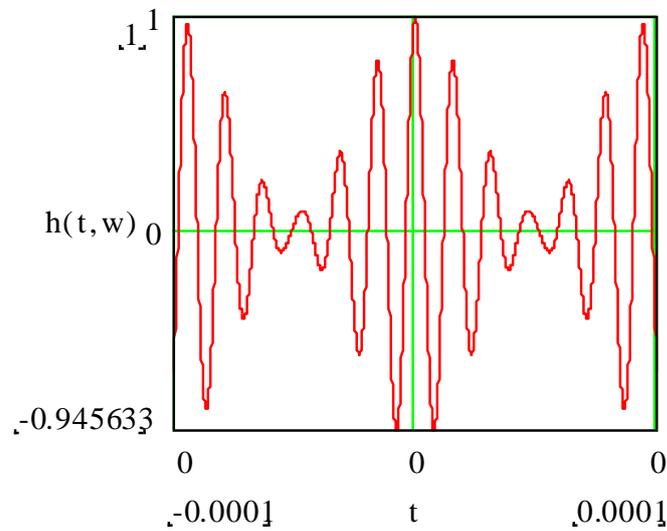


Figura 20: Rappresentazione della funzione di Hamming per  $\omega T_0=40$

Per  $|t| \leq T_0$  e con  $a(t)=0$  fuori dell'intervallo. Una rappresentazione grafica é data nella figura seguente. Nella Figura 21 si ha lo spettrogramma della parola [aiuole] e nella Figura 22 si ha la sezione effettuata in corrispondenza del cursore (riga verticale) pesata con la funzione *triangolare*.

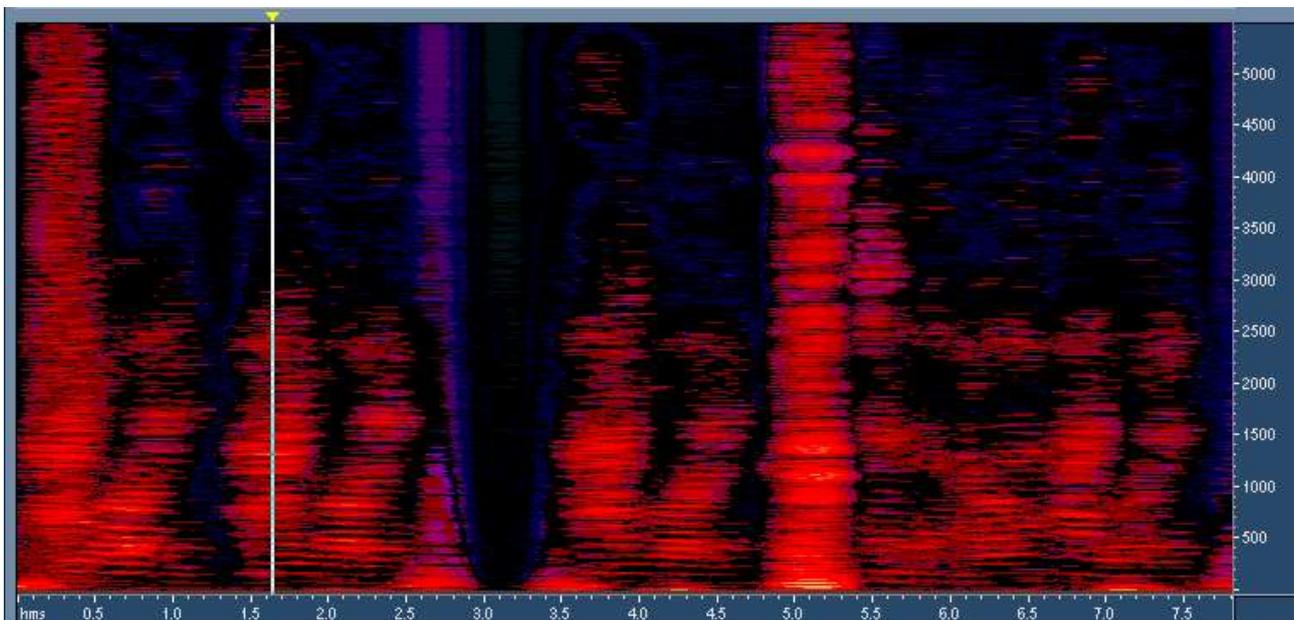


Figura 21: Spettrogramma di della parola [aiuole]

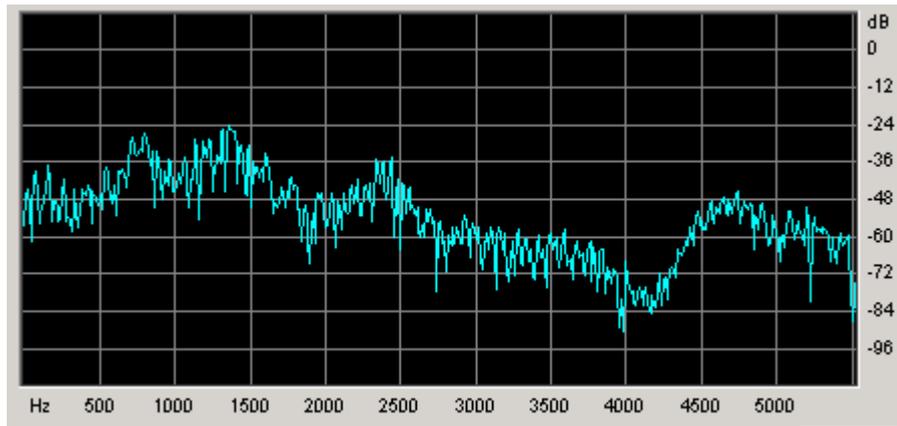


Figura 22: Sezione dello spettrogramma con finestra di pesatura triangolare

Nella Figura 23 si ha la stessa sezione pesata con una finestra di *Hamming* mentre in Figura 24 si ha una pesatura con la funzione di *Blackmann e Harris*.

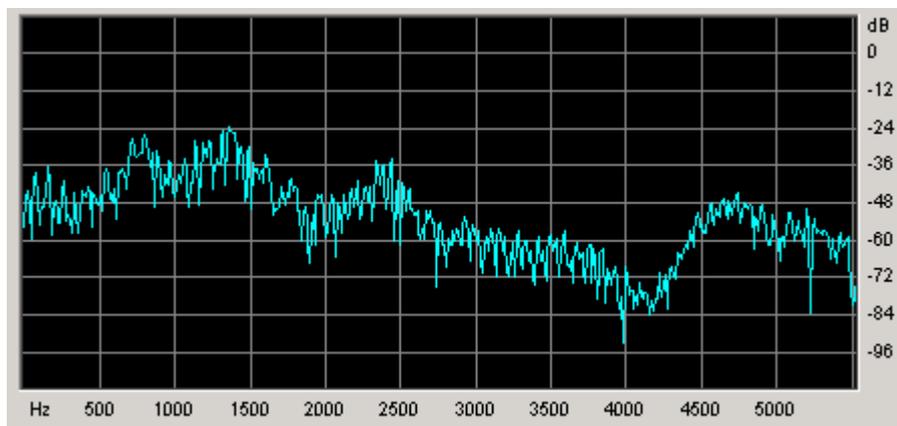


Figura 23: Stessa sezione precedente ma con finestra di *Hamming*

Come si può ben vedere la funzione di pesatura può avere rilevanza nella definizione di dettaglio delle armoniche calcolate.

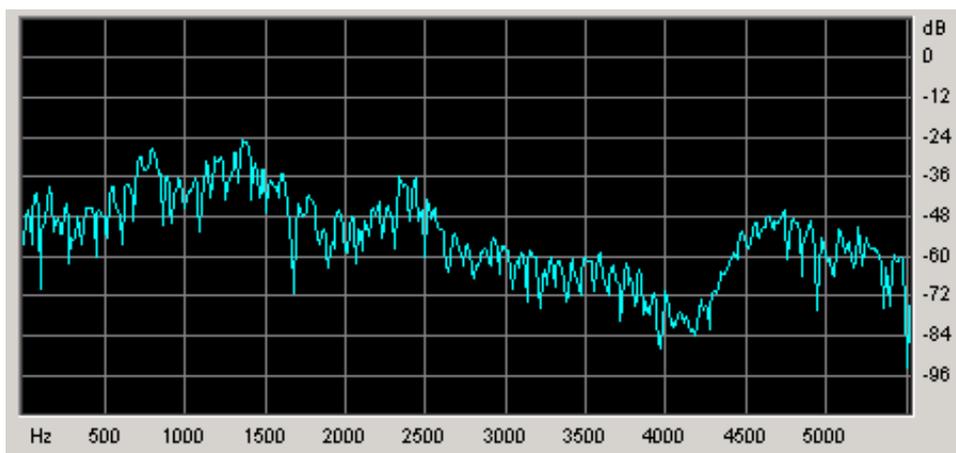


Figura 24: Stessa sezione trattata con finestra di *Blackmann - Harris*

Oggi si dispongono di numerose funzioni finestra da selezionare caso per caso a seconda del segnale da analizzare.

### Pre - Emphasis

Di solito nel software di calcolo della FFT è disponibile un'opzione detta di 6 dB *pre-emphasis*.

Quando si abilita tale opzione il segnale viene enfatizzato alle frequenze più alte prima di essere analizzato semplicemente applicando una derivata punto-punto sul segnale.

Ovviamente ciò viene fatto solamente sul calcolo lasciando inalterato il segnale originale.

La procedura consente di "amplificare" le frequenze alte con una pendenza di 6 dB/ottava e viene usata essenzialmente dove occorre evidenziare fenomeni su frequenze che vengono naturalmente "comprese".

### Analisi di un suono puro

Nelle figure seguenti si ha l'esempio di un suono puro alla frequenza di 452 Hz e della sua FFT effettuata mediante un software opportuno. La frequenza di campionamento è pari a 8 kHz e si sono applicate le relazioni indicate in precedenza per il calcolo della FFT, rappresentata in Figura 26. Si osservi come l'algoritmo numerico porti ad avere non una linea centrata a 452 Hz bensì un picco molto ristretto (ma la cui larghezza è ben visibile) centrato in corrispondenza di questa frequenza.

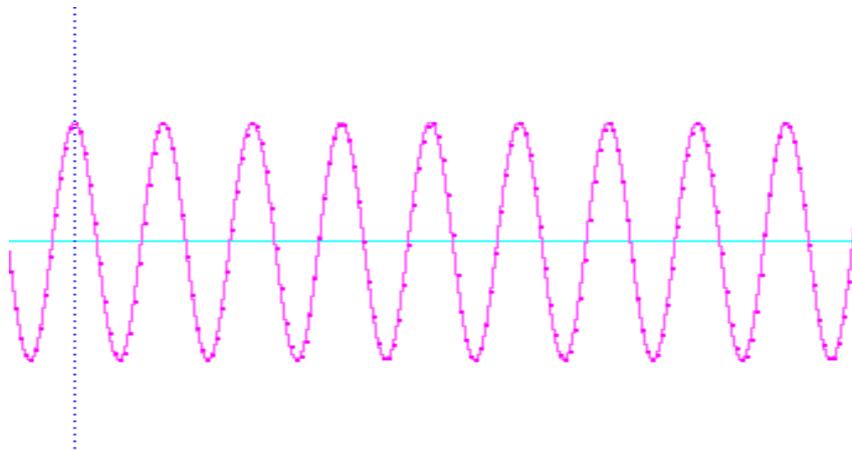


Figura 25: Suono puro a 452 Hz

L'algoritmo numerico di calcolo e di campionamento introduce, quindi un errore di troncamento nella rappresentazione spettrale che, però, non porta a conseguenze inaccettabili. Il picco, infatti, è ben centrato sulla frequenza del segnale e questo è sufficiente per l'analisi armonica.



Figura 26: Spettro FFT del suono puro a 452 Hz

Se il segnale di origine è complesso (cioè è composto da più suoni puri) allora le cose si complicano un po', come visto in precedenza. Nelle figure seguenti si ha l'esempio di un suono composto da più suoni puri a varie frequenze e della sua FFT effettuata mediante un software opportuno. Si possono osservare nella Figura 28 ben cinque armoniche le cui frequenze sono facilmente desunte in ascissa.

L'effetto degli errori di troncamento dovuti al campionamento e poi al calcolo della FFT portano alla formazione di picchi, ben visibili in figura, con alla base una sorta di rumore dovuto all'errore di calcolo. Pur tuttavia le frequenze di picco sono perfettamente calcolabili.

Si suole rappresentare un segnale in uno spazio immaginario avente nei tre assi il tempo, l'ampiezza e la frequenza di ciascuna armonica componente.

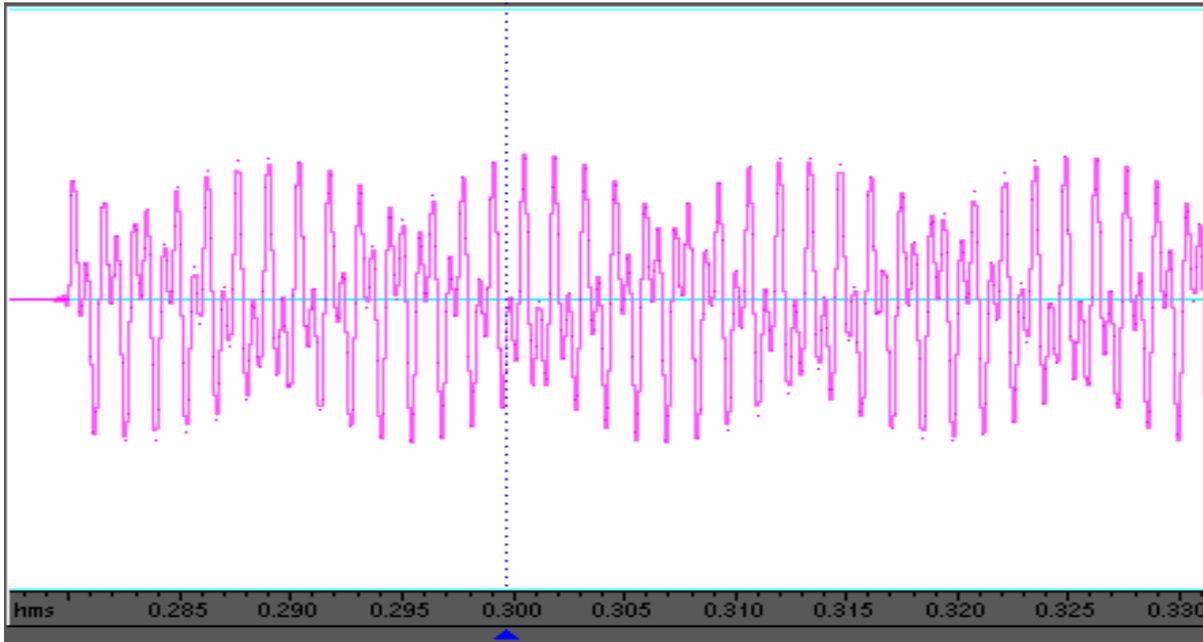


Figura 27: Rappresentazione di un suono complesso

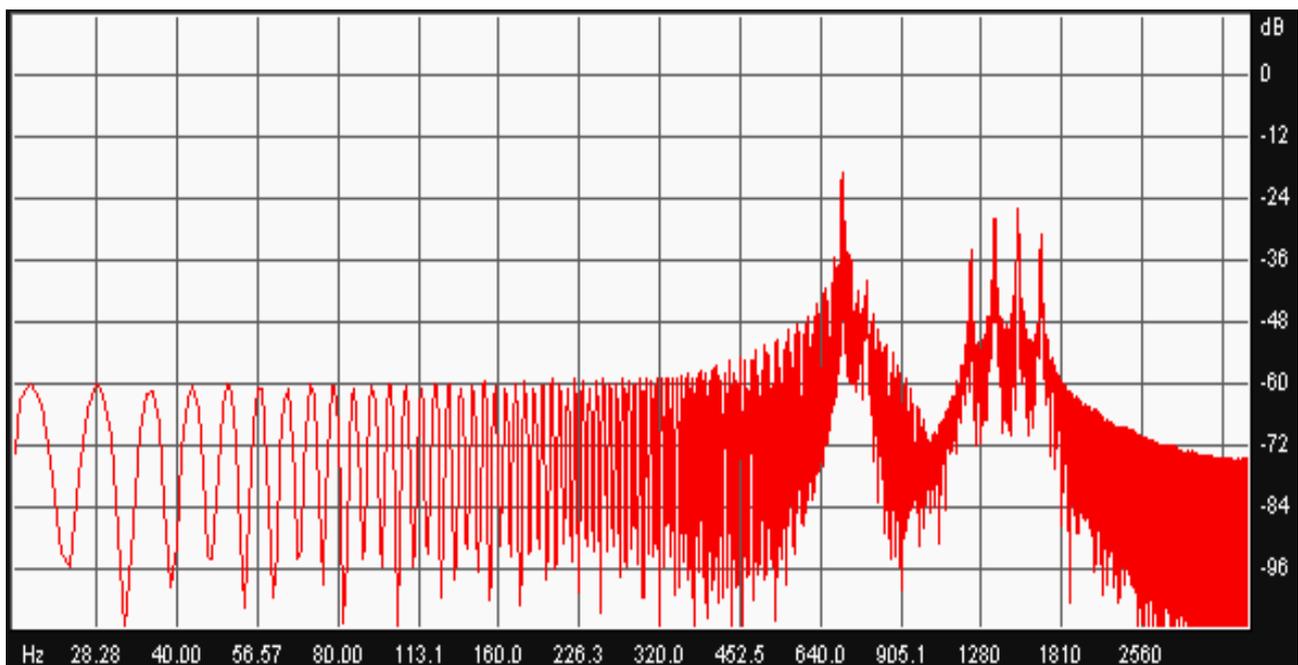


Figura 28: Analisi FFT del suono complesso

## 2.8. INNALZAMENTO DEI LIVELLI CON L'ALLARGAMENTO DELLA FINESTRA

Un suono complesso non periodico viene rappresentato, come già detto, nel piano della frequenza non con armoniche singole (come per un suono periodico) ma con una rappresentazione che dipende dalla larghezza delle *frame*.

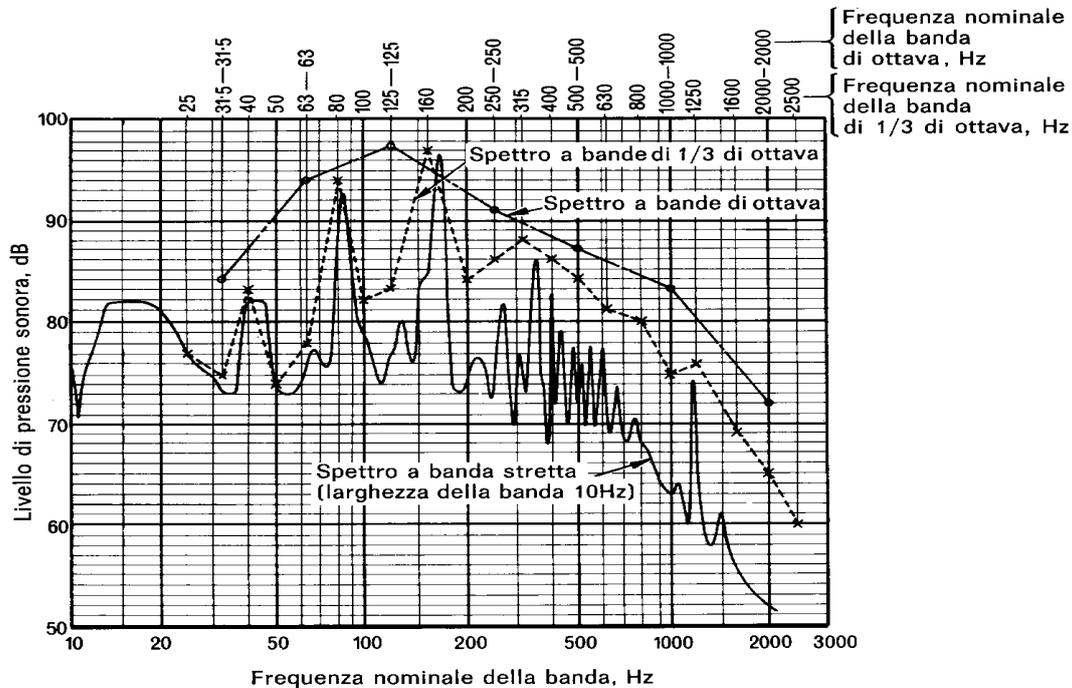


Figura 29: Rappresentazione dell'analisi frequenziale a varie larghezze di banda

In Figura 29 si riporta la rappresentazione sul piano delle frequenze di un segnale complesso in tre casi:

- Frame con larghezza di banda stretta, 10 Hz;
- Frame con larghezza di banda pari ad 1/3 di ottava;
- Frame con larghezza di banda pari ad una ottava.

In ascisse sono rappresentate le frequenze di centro banda (di ottava o terzi di ottava o a banda stretta di pochi Hz) e in ordinata i livelli di pressione sonora.

Si osservi, in Figura 29, come al crescere della banda di frequenza utilizzata nelle *frame* per l'analisi armonica cresce anche il livello di pressione sonora per via dell'involuppo che le bande larghe debbono creare sui valori delle bande strette.

In pratica l'analisi a banda larga porta ad avere livelli di centro banda tanto maggiori quanto maggiore è la larghezza di banda.

Non ci si meravigli, quindi se l'analisi a banda stretta (solitamente utilizzata in laboratorio o per applicazioni particolari quali l'analisi fonetica) porta ad avere livelli sonori inferiori.

Fra l'altro la banda stretta necessita di una maggiore sensibilità della strumentazione per via della minore energia trasportata dalle onde acustiche specialmente alle frequenze più elevate.

Le analisi spettrale a banda di terzi di ottava e di ottava sono richieste dalle norme vigenti per la rilevazione dei picchi e delle bande tonali (vedi nel prosieguo).

## 3. CENNI DI ACUSTICA FISIOLÓGICA

Ciò che chiamiamo suono è l'interpretazione psicofisica delle onde di vibrazione meccanica che colpiscono le nostre orecchie. L'apparato uditivo è dedicato a trasformare le onde meccaniche sterne in segnali elettrici che, trasmessi al cervello, sono interpretate in modo complesso come suoni. In questo capitolo si vedrà con maggior dettaglio l'apparato uditivo.

### 3.1. L'ACUSTICA FISIOLÓGICA

L'*Acustica Fisiologica* si occupa dell'interazione delle onde acustiche (fenomeno puramente fisico, cioè oggettivo) con l'*Uomo* e quindi cerca di determinarne gli effetti di interazione *soggettiva*. Spesso i parametri di giudizio sono legati proprio alla soggettività dell'*Uomo* e ciò complica non poco lo sviluppo di questa disciplina. E' proprio in quest'interpretazione psicofisica che l'*Uomo* dà significato al fenomeno meccanico trasformandolo in informazione utile per il linguaggio parlato, musicale, ambientale, ...

Occorre introdurre nuove grandezze, oltre a quelle oggettive già incontrate, che tengano conto dell'interazione con l'*Uomo* e delle sue capacità percettive.

Così, ad esempio, non tutti i suoni vengono percepiti dall'*Uomo* ma solo aventi frequenze comprese fra 20 e 20.000 Hz. Inoltre l'intensità dei suoni è correlata alle capacità di ascolto che nell'*Uomo Medio* (o *Normotipo*) varia da circa  $10^{-12}$  W (soglia di udibilità a 1000 Hz) a  $10^{-4}$  W (soglia del dolore).

## 3.2. LIVELLI SONORI

Quando si vuole quantificare con un numero la potenza emessa da una sorgente o la pressione sonora percepita, ci si trova di fronte ad una gamma di valori estesissima: si può andare dai  $10^{-7}$  Watt di una frase pronunciata a bassissima voce, ai  $10^7$  Watt prodotti, per esempio, dal motore di un razzo in partenza<sup>5</sup>. Per questa ragione, ovvero per praticità, si fa ricorso alla funzione logaritmica che consente, trasformando la lunga scala di valori di pressione e potenza, la creazione di un insieme molto più limitato di valori denominato *livello di potenza sonora* o *livello di pressione sonora*.

### Livello di Potenza sonora

Il livello di potenza sonora non è altro che il logaritmo del rapporto tra la potenza sonora che si vuole misurare e una potenza di riferimento che si assume convenzionalmente di  $1pW$

$$L_w = 10 \log_{10} \left( \frac{W}{W_0} \right) \quad dB \quad [47]$$

- $W$  = potenza sonora misurata,  $W$
- $W_0$  = potenza sonora di riferimento:  $10^{-12}$  W

L'unità di misura è il decibel (dB) e, come vedremo, viene utilizzata molto frequentemente nel campo dell'Acustica.

### Livello di Pressione sonora

Analogamente, il livello di pressione sonora, è dato dal logaritmo del rapporto tra la pressione sonora emessa dalla sorgente ed una pressione standard di  $20\mu Pa$ .

$$SPL = L_p = 20 \log_{10} \left( \frac{P}{P_0} \right) \quad dB \quad [48]$$

- $P$  = pressione sonora misurata
- $P_0$  = pressione sonora di riferimento ( $2 \cdot 10^{-5}$  Pa).

Tale definizione scaturisce da una legge fisiologica, legge di Weber, che vuole la sensibilità ad un fenomeno fisiologico inversamente proporzionale allo stimolo. Ad esempio, se poniamo nel palmo della mano un peso di 10 grammi allora possiamo sentire la variazione dello stimolo se aggiungiamo un peso di 1 grammo. Se nella mano si ha un peso di 1 kg allora non sentiremo la variazione dello stimolo per l'aggiunta di un ulteriore grammo ma dovremo variare il peso di alcune decine di grammi. Questo comportamento fisiologico è del tipo  $\Delta g = \frac{Dg}{s_0}$ , ove con  $\Delta g$  si indica la

variazione della sensazione e con  $\Delta s$  la variazione dello stimolo rispetto al valore iniziale  $s_0$ . Una tale legge porta, integrata, ad una legge di tipo logaritmica che è quella utilizzata nella definizione dei livelli.

---

<sup>5</sup> Non è questa la potenza acustica massima ma è quella limite per l'ascolto dell'Uomo. Suoni con potenza maggiore producono danni irreversibili sul timpano e sull'apparato uditivo.

### Livello di Intensità acustica

Sussiste la relazione fra intensità acustica e pressione sonora<sup>6</sup>:

$$I = \frac{\bar{p}^2}{\rho c} \quad [49]$$

con:  $\rho c$  impedenza acustica del mezzo ( $\rho c = 420 \text{ kg/s}$  per l'aria). Pertanto si definisce livello di intensità acustica:

$$LIS = 10 \log \frac{\bar{I}}{I_{rif}} \quad (\text{dB}) \quad [50]$$

con  $I_{rif} = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ . La [49] spiega perché si ha 20 a fattore nella definizione del *livello di pressione sonora* e non 10 come nella definizione del *livello di intensità sonora*. Anche se le i due livelli (di intensità e di pressione) hanno espressioni formali simili non vanno confuse tra di loro.

### Livello di Densità sonora

Con formalismo analogo si definisce il Livello di densità sonora:

$$LDS = 10 \log \frac{\bar{D}}{D_{rif}} \quad (\text{dB}) \quad [51]$$

con  $D_{rif} = 10^{-15} \text{ W/m}^3$ .

Nella tabella seguente si ha una indicazione sommaria del campo di variabilità del livello di pressione sonora.

#### VALORI MEDI DEL LIVELLO DI PRESSIONE SONORA

Pressione Sonora Pa	Livello di Pressione sonora dB	Ambiente o condizione	Valutazione soggettiva
200 63 20	140 130 120	Aereo militare in decollo a 30 m Rivettatura pneumatica (operatore) Sala caldaie (al massimo) di una nave	Intollerabile
6,3 2 0,63	110 100 90	Pressa automatica (operatore) - Laminatoio Tornitura automatica - Sala stampa - Metrololitana Autocarri pesanti a 6 m - Perforatrice pneumatica	Molto rumoroso
0,2 0,063 0,02	80 70 60	Marciapele strada con traffico intenso - Ufficio con stampanti aghi Apparecchio radio a volume alto in locali chiusi Ristorante - Grande magazzino	Rumoroso
0,0063 0,002	50 40	Conversazione ad 1 m - Ufficio pubblico Zona urbana periferica - Conversazione bisbigliata - Zona residenziale di notte	Tranquillo
0,00063 0,0002 0,000063	30 20 10	Rumore di fondo in studi televisivi di registrazione	Molto tranquillo
0,00002	0	Soglia di udibilità di un suono puro a 1000 Hz	

<sup>6</sup> In realtà più che di *pressione sonora* è più corretto parlare di *pressione efficace sonora*:  $\bar{p} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt}$

Tabella 5: Scala di valori delle pressioni sonore e dei livelli di pressione sonora

### 3.3. L'ORECCHIO UMANO

L'organo che permette all'uomo di percepire i suoni è l'orecchio. Tramite quest'organo le onde sonore meccaniche esterne vengono trasformate in impulsi nervosi che, una volta trasmessi al cervello, noi percepiamo come suoni.

Da un punto di vista anatomico l'orecchio viene diviso in tre parti (vedi Figura 30): la prima parte è l'*orecchio esterno* che riceve l'onda sonora e fa vibrare la membrana del timpano, la seconda è l'*orecchio medio* che collega meccanicamente la membrana del timpano con l'orecchio interno, la terza parte è l'*orecchio interno* dove hanno origine gli impulsi nervosi che attraverso il nervo acustico vengono trasmessi al cervello.

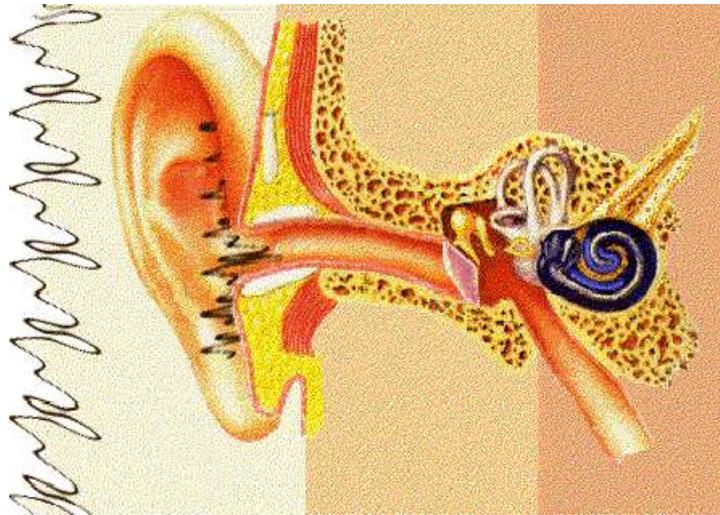


Figura 30: Vista d'Artista di un orecchio umano: orecchio esterno, medio e interno.



Figura 31: Struttura dell'orecchio esterno (padiglione auricolare) e dell'orecchio interno (Organo del Corti)

Il padiglione auricolare è la componente visibile dell'orecchio esterno; la sua funzione principale è di contribuire alla ricezione del suono.

È la forma del padiglione che può influenzare l'amplificazione o l'attenuazione di determinate frequenze. Dal padiglione parte il condotto uditivo esterno che convoglia le onde sonore alla membrana del timpano.

La spiccata sensibilità dell'orecchio umano alle frequenze attorno ai 3000 Hz si spiega con il fatto che il condotto si comporta come un tubo chiuso all'estremità con una frequenza di risonanza all'incirca di 3000 Hz.

L'orecchio esterno è separato dall'orecchio medio dalla membrana del timpano: essa ha la forma di un cono piatto con un diametro di circa sette millimetri e la convessità rivolta verso l'interno.

L'orecchio medio è una cavità piena d'aria che contiene la catena di ossicini ossia tre piccole ossa, il *martello*, l'*incudine* e la *staffa*, che forniscono il movimento meccanico per far passare la vibrazione dal timpano all'orecchio interno. Il martello sta appoggiato sul timpano e quando viene messo in vibrazione colpisce l'incudine, il secondo ossicino che funge da connessione con il terzo, la staffa. Questa è a contatto con la finestra ovale, un'altra membrana che segna l'entrata della chiocciola.

La catena d'ossicini è connessa a dei legamenti e posta in tensione attraverso due piccoli muscoli: il *tensor* del timpano e lo *strapedio*. Il primo è connesso al martello, il secondo alla staffa. Questo sistema da una parte è un efficace meccanismo di trasmissione tra orecchio esterno e finestra ovale, dall'altra funziona come apparato protettivo in quanto limita la vibrazione trasmessa alla finestra ovale.

La presenza di aria nell'orecchio medio fa in modo di compensare la spinta della pressione atmosferica sul timpano, ciò avviene tramite il tubo di *Eustachio* che mette in comunicazione l'orecchio medio con il setto nasale. L'orecchio interno si presenta come un complesso sistema di canali colmi di liquido inseriti nell'osso temporale.

## 2.5 Physical Hearing System 27

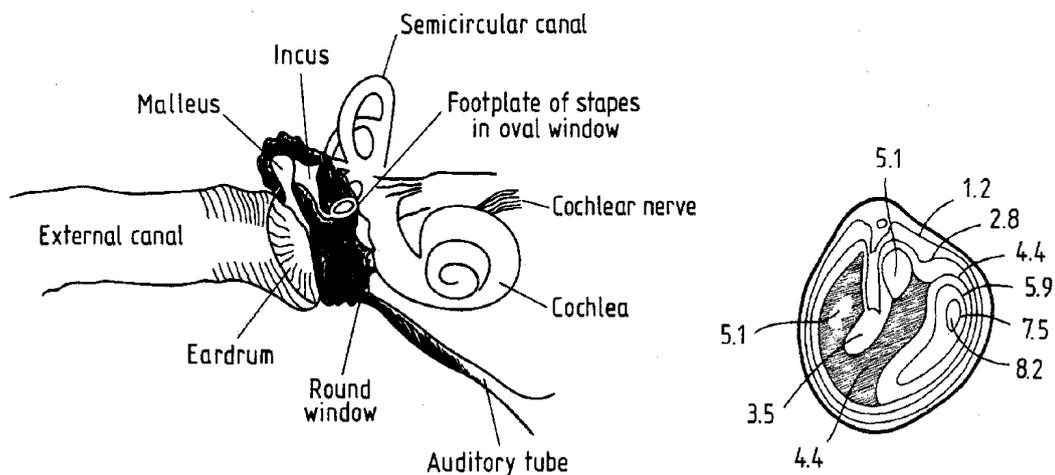


Figura 32: Struttura dell'orecchio interno e della coclea

Nell'uomo il senso dell'equilibrio e dell'udito viene dato dai nervi sensori posti all'interno di questi canali che terminano nella chiocciola. All'interno di quest'ultima troviamo una membrana detta basale che viene eccitata attraverso l'energia trasmessa alla chiocciola dalla finestra ovale.

Questa membrana a seconda della frequenza del suono risulta più eccitata in un punto rispetto ad un altro: le basse frequenze generano maggiore eccitazione all'estremità della chiocciola, le alte invece nei pressi della finestra ovale.

La stimolazione delle fibre nervose coinvolge una complessa struttura posta sulla membrana basale chiamata organo di Corti (vedi Figura 33).

Le cellule ciliate interne ed esterne che fanno parte di quest'organo sono le principali responsabili del processo di stimolazione nervosa, pare infatti vi sia una dipendenza diretta tra il danno subito da queste cellule e la perdita di udito dovuta al rumore.

Sezionando l'organo del Corti si ha la situazione della figura seguente: in pratica le terminazioni nervose sono comprese fra due lamine di tessuto organico che, per strofinio dovuto all'eccitazione acustica, eccitano le cellule nervose in zone differenti a seconda della frequenza di eccitazione.

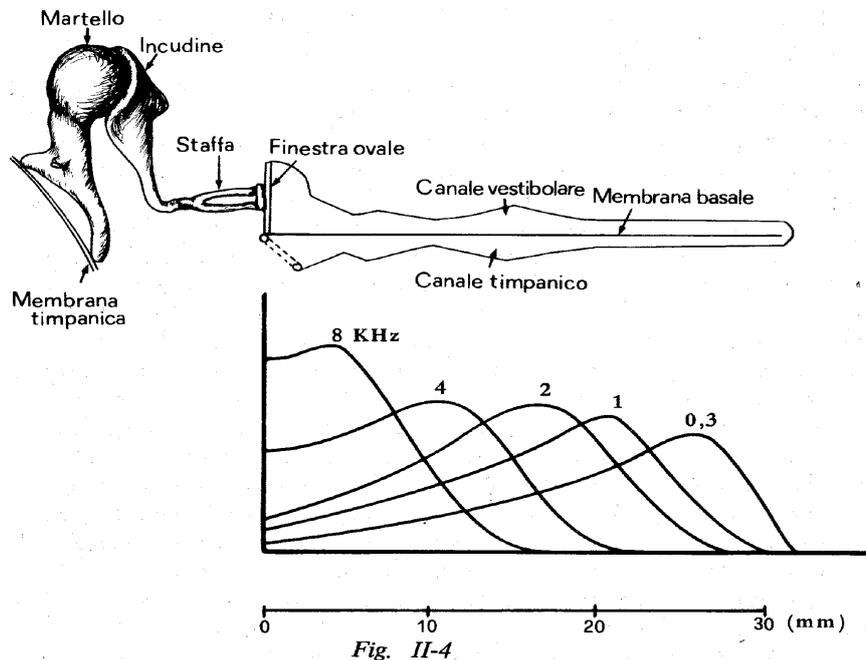


Figura 33: Eccitazione delle terminazioni nervose

26 2. Sound Transmission Systems

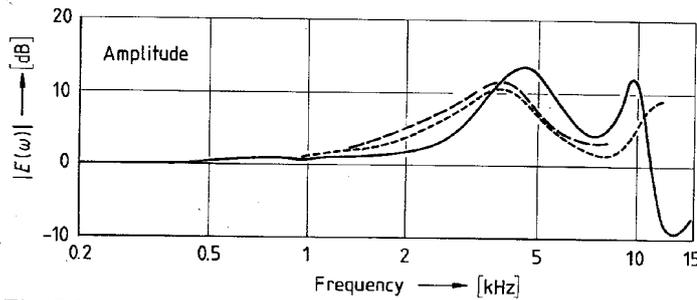


Fig. 2.14

Fig. 2.14. Transfer functions of the ear canal: (---) from [2.19]; (-.-) from [2.20]; and (—) from [2.18]

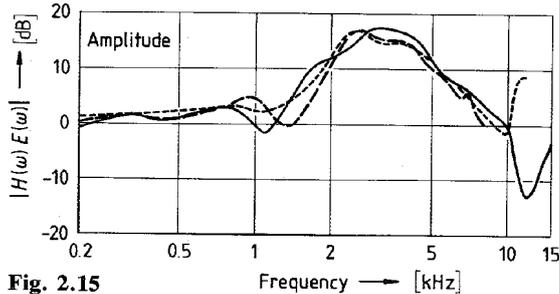


Fig. 2.15

Fig. 2.15. Transfer functions from a sound source in front of the listener to the eardrum: (---) from [2.19]; (-.-) from [2.20]; and (—) from [2.18]

Figura 34: Funzioni di trasferimento dell'orecchio esterno.

Le moderne teorie vedono l'orecchio come un sistema di trasmissione del segnale caratterizzato dalle tre funzioni di trasferimento relative alle tre sezioni dell'orecchio: *padiglione esterno*, *canale timpanico*, *orecchio medio*. Per l'orecchio esterno in corrispondenza del canale timpanico e del padiglione esterno si hanno le seguenti funzioni di trasferimento del segnale uditivo. Per l'orecchio medio la funzione di trasferimento determinata su cadaveri (*Békésy*) è del tipo qui rappresentato.

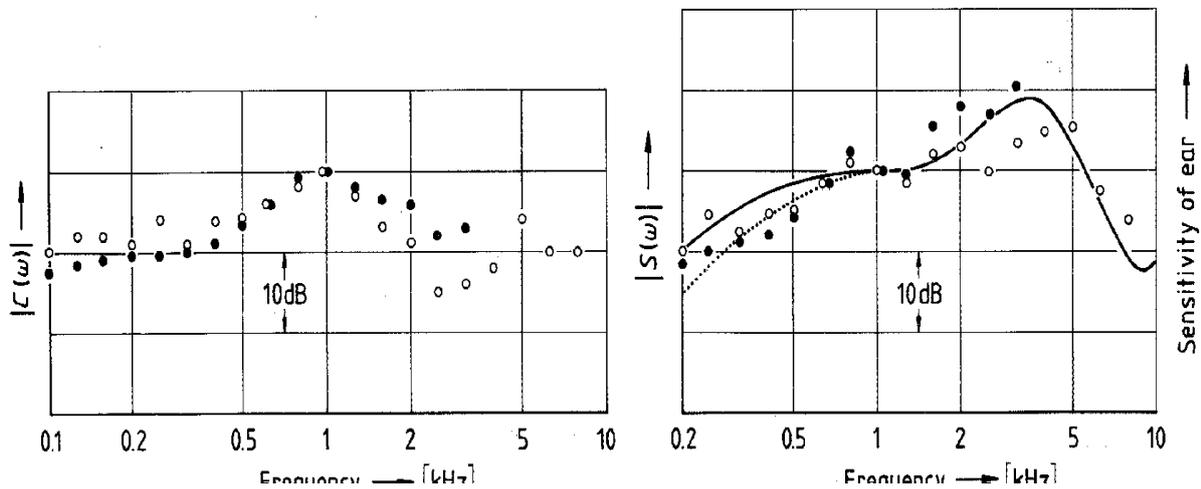


Figura 35 :Funzione di trasferimento dell'orecchio interno (Von Békésy)

Per un campo sonoro libero si hanno le seguenti funzioni di trasferimento dal padiglione auricolare esterno al canale timpanico in funzione dell'angolo orizzontale di accesso.

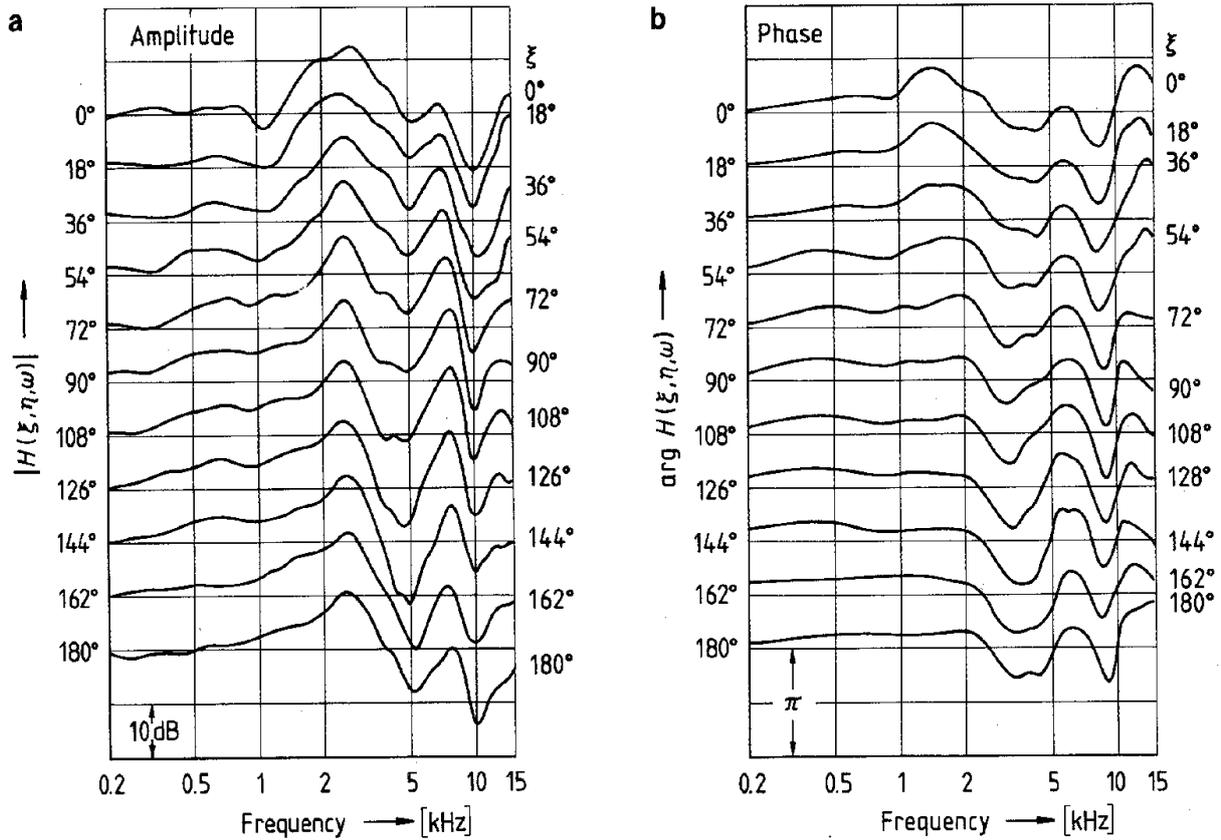


Figura 36: Funzioni di trasferimento del canale timpanico

La rete nervosa risulta composta come in figura da neuroni collegati fra loro da *assoni* (che hanno alla loro estremità le *sinapsi*).

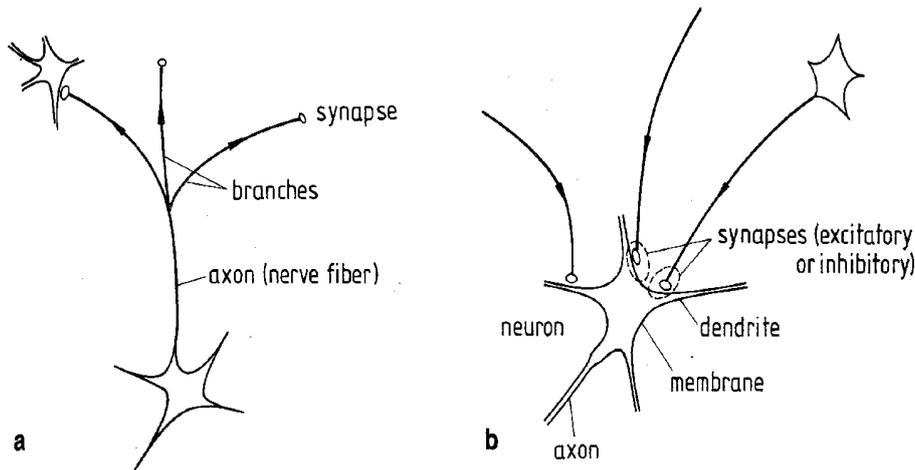


Fig. 2.24a, b. Connections of neurons. (a) Divergence; (b) convergence

Figura 37: Struttura di un neurone.

Il segnale neurale *pre* e *post-sinaptico* è rappresentato nelle seguente figura ove è visibile una variazione di potenziale da  $-70$  a  $+30$  mV con un tempo di variazione di circa 3 ms.

Osservando la scala dei tempi si possono ritrovare giustificazioni alle frequenze caratteristiche dell'orecchio umano.

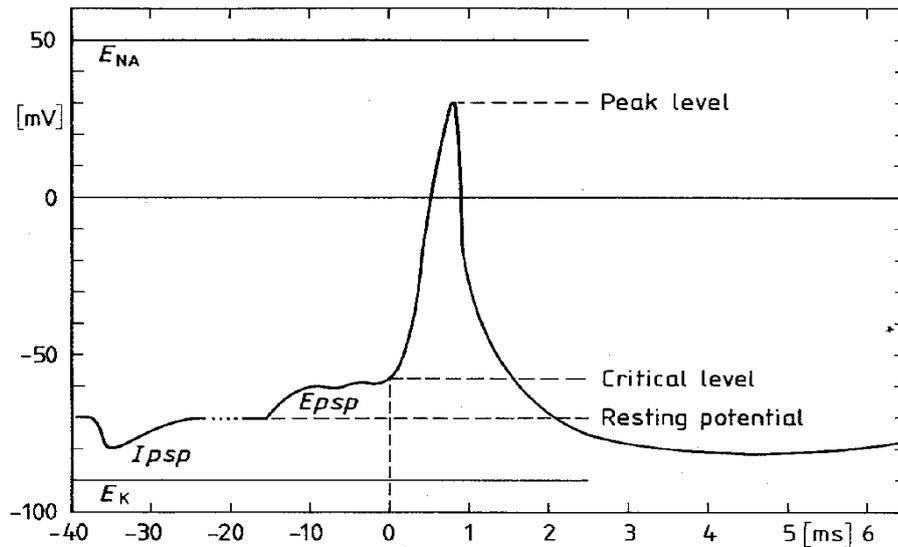


Figura 38: Segnale di attivazione sinaptico.

Agli inizi degli anni 'quaranta due studiosi americani della ATT, *Fletcher* e *Munson*, costruirono l'abaco della Figura 39, detto **Audiogramma Normale** per suoni puri. In esso è riportata in basso, tratteggiata, la *soglia di udibilità* e poi, andando verso l'alto, le curve *isofoniche* definite in modo che ogni curva rappresenta, per ciascuna frequenza, il livello sonoro di pari effetto (*sensazione di forza*) di un suono a 1000 Hz. Questo livello è chiamato *Phon*.

Si osservi come l'orecchio umano medio sia capace di sentire in modo diverso sia al variare della frequenza che al variare del livello. Ogni curva *isofonica* ha un andamento a campana: sentiamo meglio le frequenze intermedie (quelle della zona del parlato da 500 a 2000 Hz) mentre sentiamo peggio le basse e le alte frequenze.

Inoltre al crescere dell'intensità sonora le curve si appiattiscono per effetto della maggiore tensione muscolare dei muscoli del *Timpano* e dello *Stabiale* che riducono la sensibilità dell'orecchio medio (i tre ossicini, staffa, incudine e martello).

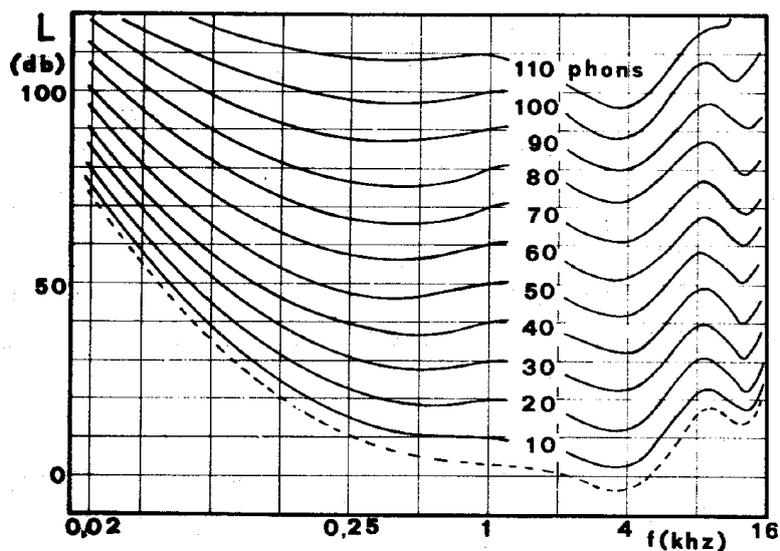


Figura 39: Curve isofoniche per toni puri (audiogramma normale di Fletcher - Munson)

L'*audiogramma* di Fletcher e Munson è stato per decenni l'unica informazione esterna sul funzionamento dell'orecchio umano. È interessante osservare come, rendendo omogenei l'audiogramma (cioè capovolgendolo rispetto all'asse delle frequenze) e la curva relativa alla

funzione di trasferimento dell'orecchio medio (Von Békésy, Figura 35) si ha la situazione di Figura 40.

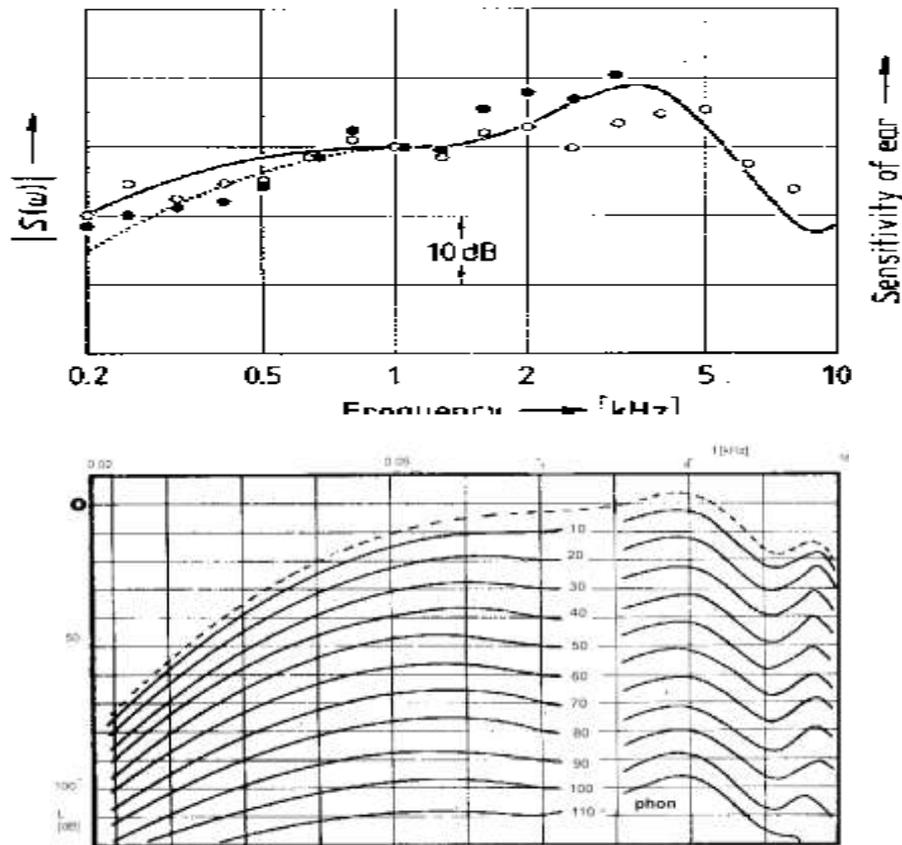


Figura 40: Confronto fra la funzione di trasferimento dell'orecchio medio e l'audiogramma normale

Sia la forma ondulante che l'andamento a campana risultano ora perfettamente spiegati: l'orecchio umano, per il solo fatto di essere costruito da madre natura in questo modo, si comporta come sintetizzato dall'audiogramma normale.

La banda di frequenze fra 2500÷4000 Hz presenta una risonanza e quindi in questa zona si ha una maggiore sensibilità dell'orecchio che può portare ad effetti pericolosi fino alla parziale rottura delle terminazioni nervose (sordità parziale per effetto *Brue*l).

Si osservi che l'audiogramma normale ci informa su come l'organo di captazione del suono funziona, cioè come viene modificato il segnale prima di essere interpretato (sensazione) dal cervello. In pratica il nostro orecchio si comporta come un filtro *passa-banda* avente funzioni di trasferimento complesse date proprio dall'audiogramma di Fletcher e Munson.

Di quest'osservazione si terrà conto quando parleremo del *fonometro*. E' interessante osservare come l'energia acustica non arrivi all'orecchio esterno esclusivamente per via aerea dal padiglione auricolare ma anche attraverso le ossa del cranio.

Se noi chiudiamo il condotto uditivo esterno con un tappo o una cuffia avvertiamo immediatamente il suono attraverso la conduzione ossea. Questa avviene attraverso vari cammini di trasmissione: anche le vibrazioni prodotte dalle altre parti del corpo possono essere trasmesse alla membrana basale attraverso i tessuti corporei e la struttura ossea.

E' proprio a questa conduzione ossea che si deve la possibilità di percepire la direzione delle onde sonore in un piano verticale centrale rispetto alla sorgente. In pratica è la differenza di cammino dell'onda acustica fra orecchio destro e sinistro a far percepire al nostro cervello la direzione di provenienza del suono.

Quando però l'orecchio è in un piano centrale simmetrico le condizioni di simmetria farebbero perdere la possibilità di individuare la direzione del suono se non ci fosse la possibilità di percepire anche differenze di cammino sonoro anche nel piano verticale per conduzione ossea.

### 3.3.1. SOGLIA UDITIVA

Nella Figura 41 è riportato l'audiogramma di un soggetto ricavato mediante il metodo AUDIO-CD della *Digital Recording*. Il metodo consiste nell'ascoltare un segnale di frequenza fra 20 e 20 kHz e di intensità calibrata e variabile da 0 a 80 dB e di segnare il livello di inizio ascolto (soglia).

E' anche riportato l'andamento della soglia normale come indicato dalla ISO e dalla Società di Audiologia.

L'audiogramma del soggetto presenta un innalzamento superiore ai 10 dB alle frequenze centrali e una apparente sordità alle frequenze superiori ai 12 kHz.

Lo scostamento della curva di udibilità reale da quella standard è sintomo di perdita uditiva (sordità) attribuibile ad una serie di cause: l'età (che porta la presbiacusia), un danno da rumore esterno per esposizione prolungata per attività lavorativa, ....

Si esamineranno le problematiche del rischio uditivo nel prosieguo.

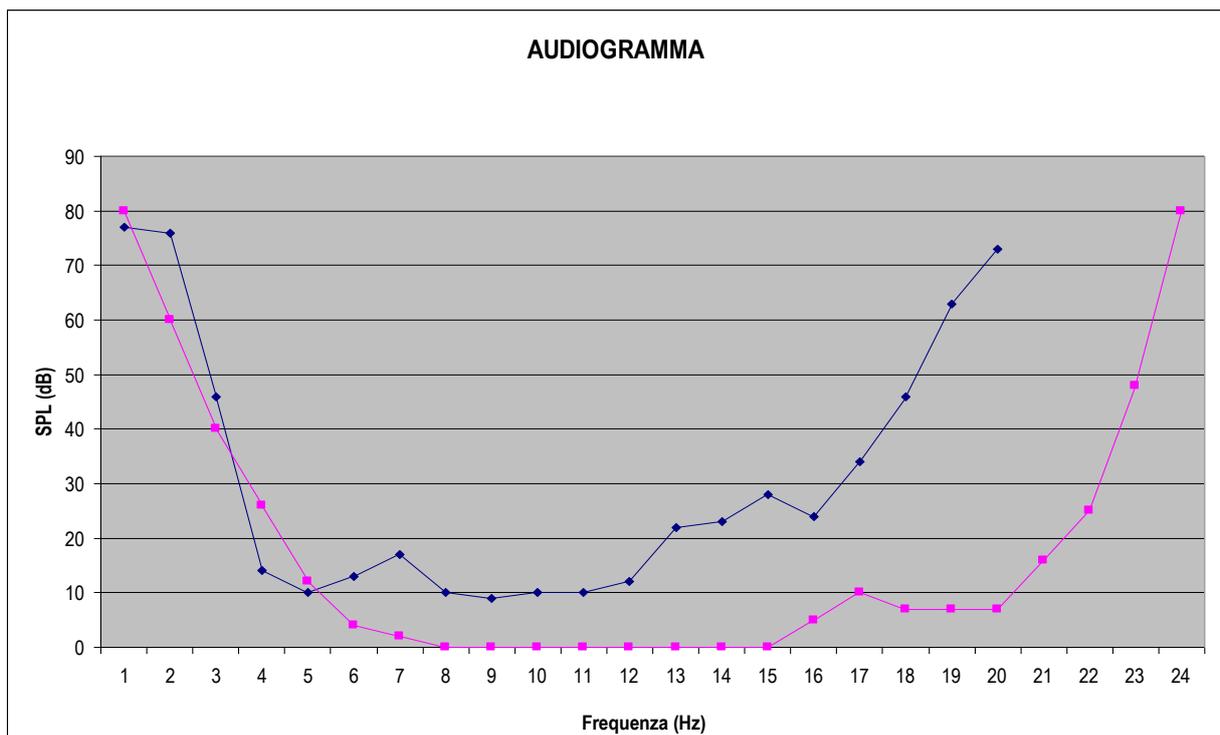


Figura 41: Curva di udibilità reale di un soggetto e confronto con la curva di soglia standard

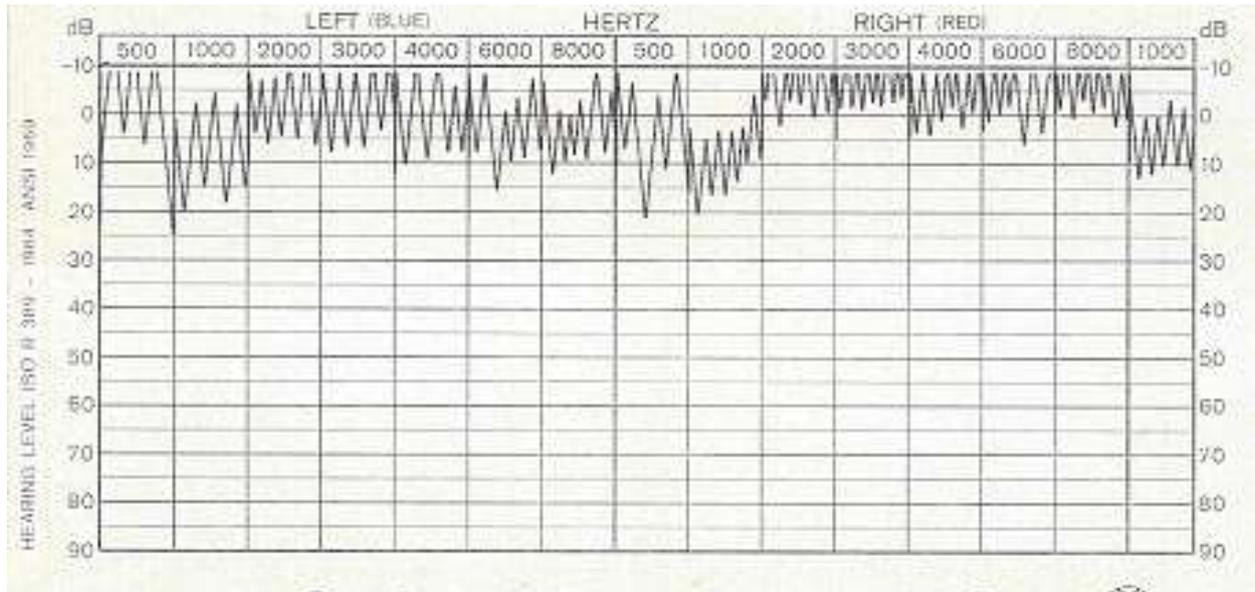


Figura 42: Esempio di audiogramma di un soggetto normale

### 3.3.2. PERCEZIONE SOGGETTIVA DEL SUONO

La valutazione soggettiva del suono da parte dell'uomo è influenzata dall'ampia gamma di pressioni e frequenze entro la quale l'orecchio percepisce segnali utili.

L'*area di sensibilità* acustica, ossia l'insieme di valori all'interno del quale l'orecchio può funzionare, è delimitata a bassi livelli di pressione sonora dalla *soglia di udibilità* e ad alti livelli dalla *soglia di non-comfort, disturbo, dolore* (oltre i 120 dB).

L'organo dell'udito ha però delle limitazioni anche nella percezione delle frequenze: il "*range*" delle frequenze udibili viene denominato *campo di udibilità*.

Per le alte frequenze si usa convenzionalmente fissare il limite dei 20.000 Hz (anche se questo limite può variare molto da individuo ad individuo) mentre per le basse frequenze il limite è di 20 Hz; al di sotto le onde sonore si percepiscono come vibrazione del corpo piuttosto che come sensazione sonora vera e propria.

Abbiamo detto che la minima pressione sonora di un tono capace di provocare una sensazione acustica è chiamata soglia di udibilità.

Questa è funzione della frequenza ma dipende anche dal modo in cui viene riprodotto il suono (cuffie, altoparlanti) e dal punto in cui viene misurata la pressione sonora.

Una soglia misurata in presenza di altre fonti di rumore viene definita *mascherata*: è la pressione sonora alla quale un suono coperto da altri, cioè mascherato, comincia ad essere percepito.

La soglia di non comfort è stata ricavata sperimentalmente e fissata intorno ai 120 dB, livello con il quale si prova una forte sensazione di fastidio.

Intorno ai 110 dB è fissata la soglia di disturbo con sensazioni di prurito dell'apparato uditivo; a 120÷130 dB si raggiunge la soglia del dolore che può comportare la sordità temporanea o permanente anche per brevi esposizioni.

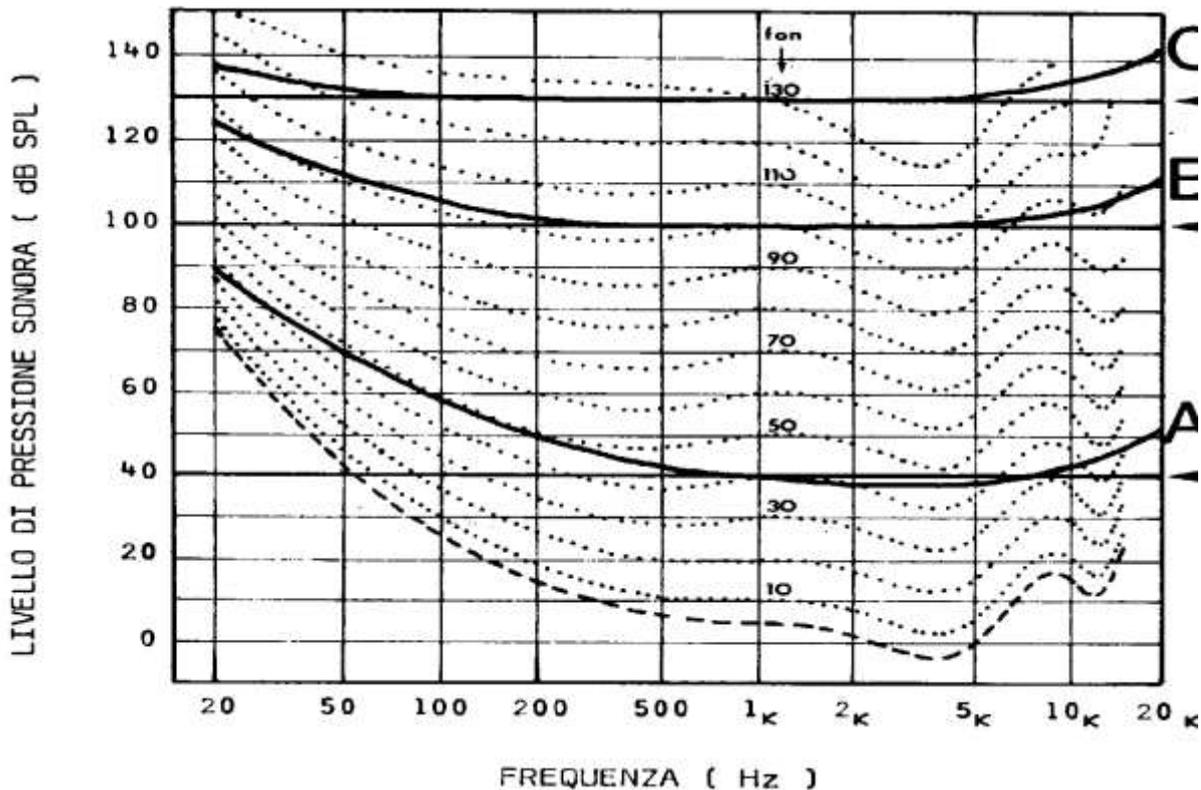


Figura 43: Confronto fra le curve fonometriche e l'Audiogramma normale

### 3.4. LIVELLI DI PRESSIONE PONDERATI- LE SCALE FONOMETRICHE

Nella valutazione del rumore si ha spesso a che fare con i cosiddetti livelli ponderati. I moderni strumenti per la misurazione presentano infatti dei filtri di pesatura denominati *A*, *B*, *C*. Esiste anche una scala denominata *D* utilizzata per misure di rumorosità in zone aeroportuali.

Come abbiamo già visto, la sensibilità dell'udito è incostante col modificarsi della frequenza e del livello sonoro; si presenta allora, per chiunque voglia eseguire delle misure di rumore attendibili, la necessità di adottare una strumentazione che emuli la caratteristica dell'organo uditivo.

La sensibilità dello strumento viene così regolata secondo tre curve conosciute come *curve di ponderazione A*, *B*, *C* che presentano andamenti della sensibilità leggermente diversi tra di loro anche se tutti decrescenti verso gli estremi del campo uditivo.

Le curve di ponderazione derivano da considerazioni sull'audiogramma di *Fletcher e Munson* e presentano una forte analogia con le isofoniche misurate in *Phon*, vedi Figura 43.

Il fonometro è costituito da sezioni elettroniche ben precise: microfono, amplificatore di segnali di ingresso, filtri, amplificatore di uscita e indicatore di segnali (sia analogico che digitale). Nella Figura 44 è riportata una schematizzazione di assemblaggio di un moderno fonometro capace di effettuare anche analisi spettrali (FFT, bande larghe, ...) di un suono.

I livelli misurati con queste correzioni si indicano in dB anche se talvolta può succedere di incontrare la forma dB(A) per il livello ponderato A.

Quest'ultimo è il più utilizzato perché ritenuto dagli addetti maggiormente indicativo nelle misurazioni più comuni e quello meglio correlato al disturbo.

Siamo arrivati così a definire univocamente il disturbo attraverso una sola grandezza che lega assieme il dato oggettivo, la misura del rumore come ci arriva dalle sorgenti, al dato soggettivo, ciò che un ascoltatore medio percepisce come suono.

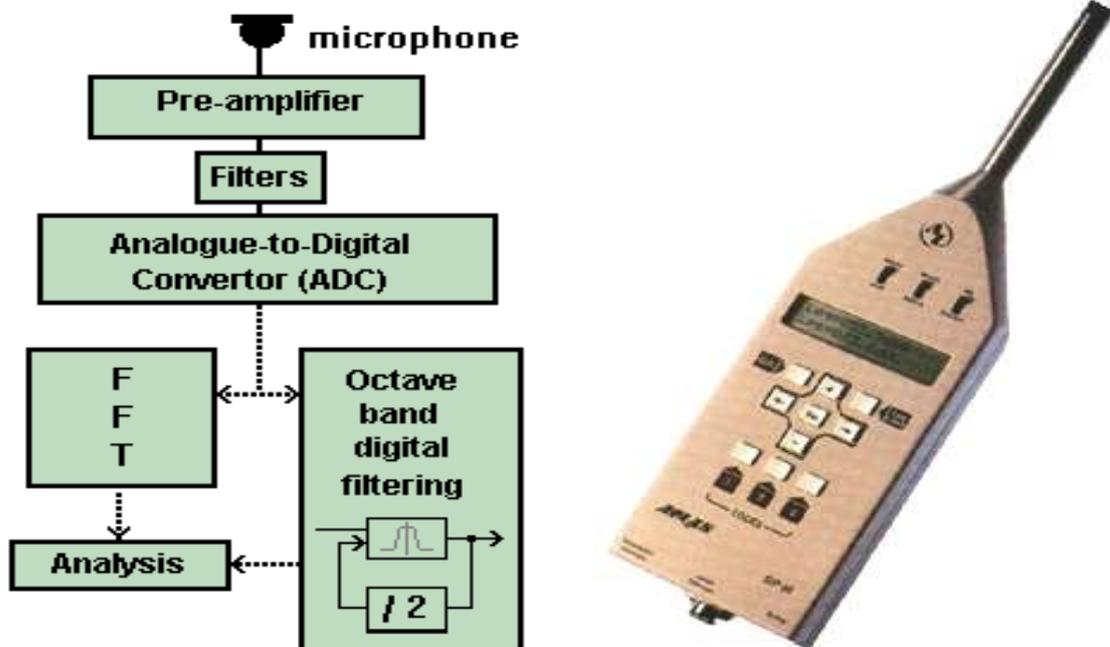


Figura 44: Diagramma a blocchi di un fonometro e un moderno modello commerciale

La scelta delle curve A, B e C si giustifica con la necessità di simulare il comportamento dell'orecchio umano medio ai livelli bassi, medi e alti, come rappresentato in Figura 43.

Nella Tabella 6 si riporta l'azione di filtraggio del fonometro (Scala A) e in basso, in Figura 45 si ha la modificazione spettrale (a banda di ottava) dovuta alla curva di ponderazione A.

Si osservi come il segnale originario resta immutato nella banda di ottava a 1000 Hz mentre viene attenuato sia alle basse che alle alte frequenze. I valori in dB differiscono di circa 5 dB.

Ricordando che l'azione dei filtri di pesatura è quella di simulare il comportamento dell'orecchio umano si conclude che l'effetto di captazione e trasmissione sonora da parte dell'orecchio comporta un'attenuazione non trascurabile del segnale originario.

L'orecchio è, a tutti gli effetti, un filtro passa banda con attenuazione pronunciata verso le frequenze di taglio.

Frequency (Hz)	road traffic noise spectrum dB	A - weighting	road traffic noise spectrum dB(A)
125	106.4	-16.1	90.3
250	104.6	-8.6	96
500	101.7	-3.2	98.5
1000	99.9	0	99.9
2000	98	1.2	99.2
4000	93.1	1	94.1
global level	110.2 dB	spectra plots	105.2 dB(A)

Tabella 6: Attenuazioni dei filtri di pesatura A

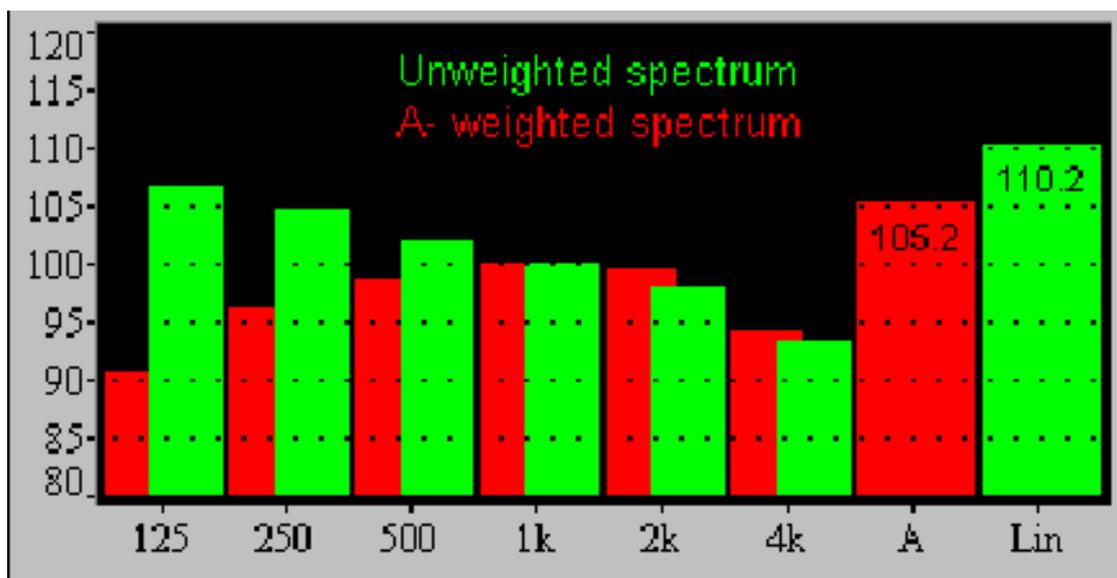


Figura 45: Spettro a banda di ottava del segnale non filtrato e di quello filtrato

### 3.5. LIVELLO EQUIVALENTE (LEQ)

Il livello equivalente, per il suo significato fisico, viene quasi universalmente utilizzato come riferimento nelle varie normative in materia di inquinamento acustico ambientale.

Tale parametro, essendo associato all'energia sonora di un fenomeno acustico, viene influenzato dai livelli sonori a maggior contenuto energetico ovvero dai livelli di picco; per questo motivo risulta un buon descrittore del rumore, così come il DPCM 1/3/91 lo ha definito.

L'andamento storico del  $L_{eq}$  orario offre delle informazioni interessanti, come per esempio la possibilità di distinguere se le sorgenti che lo hanno causato sono naturali o artificiali.

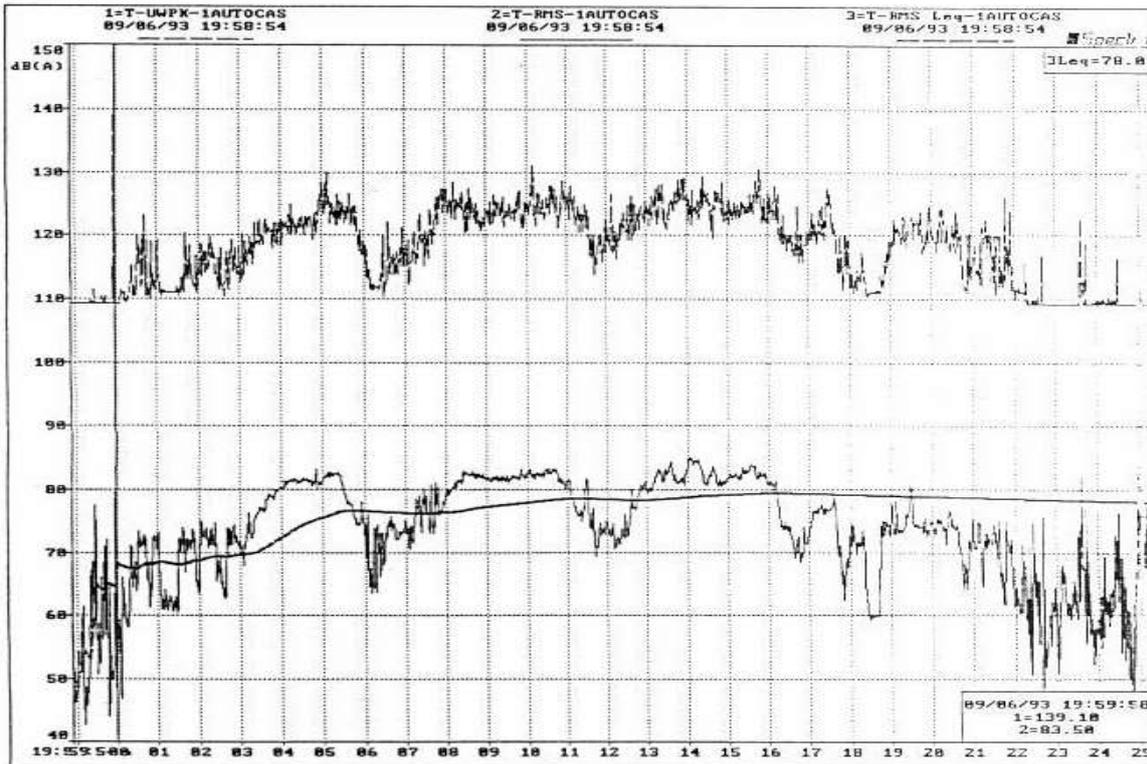


Figura 46: Andamento del LPS, Leq, L picco non pesato.

Il Livello equivalente è definito dalla relazione:

$$Leq_A = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \quad [52]$$

ove:

- $T$  = tempo di osservazione
- $p_t$  = pressione sonora istantanea ponderata A
- $p_0$  = pressione sonora di riferimento

Nella Figura 46 si ha l'andamento temporale del livello di pressione sonora (in dB) e del livello equivalente (calcolato per un intervallo di 1 s e riportato sullo stesso diagramma del LPS): si può osservare come i picchi non siano più visibili nella sequenza temporale di Leq ma solo i valori medi.

### 3.6. LOCALIZZAZIONE ACUSTICA

L'ascolto del suono dalle due orecchie non serve solamente ad avere un effetto stereofonico del suono ma anche (e forse soprattutto) alla sua localizzazione spaziale.

Va precisato, inoltre, che i due lobi del cervello non lavora allo stesso modo ma quello di sinistra è specializzato nell'elaborazione di suoni complessi (ad es empio consonanti) mentre quello di destra elabora i suoni più semplici (ad esempio le vocali). I

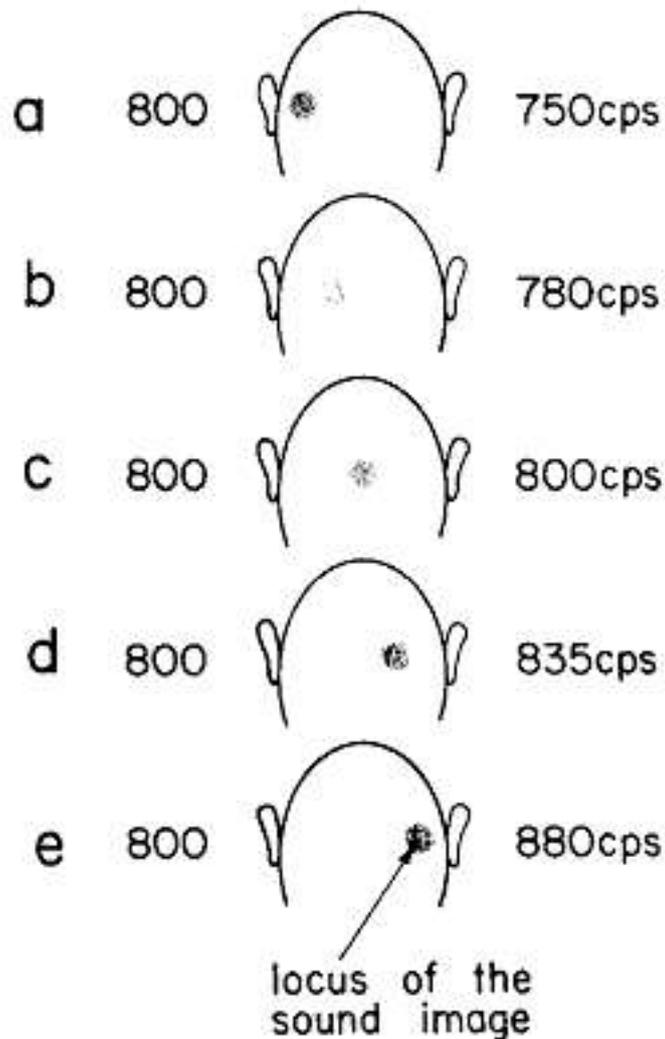


Figura 47: Localizzazione della sorgente sonora

Il nostro cervello elabora i segnali che arrivano dalle due orecchie e dal loro sfasamento temporale determina la direzione di provenienza con buona precisione.

Qualora il suono provenga frontalmente vengono utilizzati anche i segnali che provengono dalle vibrazioni corporee (ad esempio della testa o delle cartilagini dell'orecchio) per determinare la posizione verticale della sorgente.

Questa capacità di localizzazione acustica è oggi molto utilizzata negli effetti *surround* dei sistemi di riproduzione sonora.

In questo caso si fa variare di poco la fase dei segnali provenienti dalle casse acustiche in modo da ottenere una *sensazione* equivalente allo spostamento della sorgente attorno al capo.

Gli studi di psicoacustica hanno portato a meglio comprendere l'interpretazione sonora da parte del nostro cervello e a creare dispositivi artificiali (protesi acustiche) con prestazioni sempre più vicine a quelle dell'orecchio. E' recente la notizia dell'applicazione di protesi elettroniche che, sostituendo l'orecchio, hanno consentito ai soggetti non udenti di sentire.

Si osservi, ancora, che il cervello si sincronizza con l'onda acustica che per prima raggiunge l'orecchio, cioè con l'onda diretta. Le onde successive a questa sono considerate di rinforzo se il loro ritardo non è superiore a 200 ms. Oltre tale limite il cervello considera i suoni separati e ciò giustifica la formazione dell'eco.

Oltre all'azione di rinforzo sopra citata, il ritardo temporale fra la prima onda e le successive gioca un ruolo fondamentale nella psicoacustica del suono. Si è mostrato, infatti, che le onde aventi un ritardo di  $15 \div 25$  ms (corrispondenti a riflessioni da superfici distanti entro  $6 \div 8$  m dall'ascoltatore e che sono dette *onde di riflessione laterale vicine*) oltre a rafforzare l'onda primaria contribuiscono a creare una sensazione di *spazialità* (orizzontale o verticale a seconda del piano di provenienza) e quindi provocano una sensazione di *allargamento della scena*. Il suono sembra avvolgere l'ascoltatore che ne trae anche una sensazione di benessere acustico, di piacere dell'ascolto.

E' per questo motivo che l'ascolto della musica dal vivo è ben diverso da quello di una registrazione, per quanto fedele, fatta in cuffia: si perdono tutte le informazioni di spazialità (vedi capitolo sull'Acustica delle Sale) che fanno parte del suono originario.

Le riflessioni successive ai primi 25 ms sono onde di riverbero che, pur fornendo un rafforzamento del suono iniziale, non rivestono l'importanza fondamentale delle riflessioni vicine.

### 3.7. SPECIALIZZAZIONE DELL'UDITO

Recenti studi hanno mostrato una specializzazione dell'udito nel senso che i suoni complessi vengono sintetizzati nella parte destra del cervello mentre quelli più semplici dalla parte sinistra.

Ciò significa, visti i collegamenti incrociati, che l'orecchio sinistro è specializzato nell'ascolto di suoni ad alto contenuto informativo (ad esempio le consonanti) mentre l'orecchio destro è specializzato nei suoni semplici (ad esempio le vocali). L'ascolto complessivo del suono è in pratica proporzionale alla correlazione mutua dei segnali captati dalle due orecchie.

Se si effettua l'autocorrelazione di un segnale secondo la relazione:

$$\phi(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \left[ \int_{-T}^{+T} p(t) p(t + \tau) dt \right]$$

L'autocorrelazione di un segnale al tempo iniziale è pari alla potenza del segnale.

Y. Ando ha studiato l'andamento della funzione di autocorrelazione per alcuni segnali musicali e per la voce umana (lettura di una poesia da parte di una donna), vedi Tabella 7.

I segnali sono indicati in ordine a partire dalla lettera A fino alla lettera K. Il parlato è indicato separatamente.

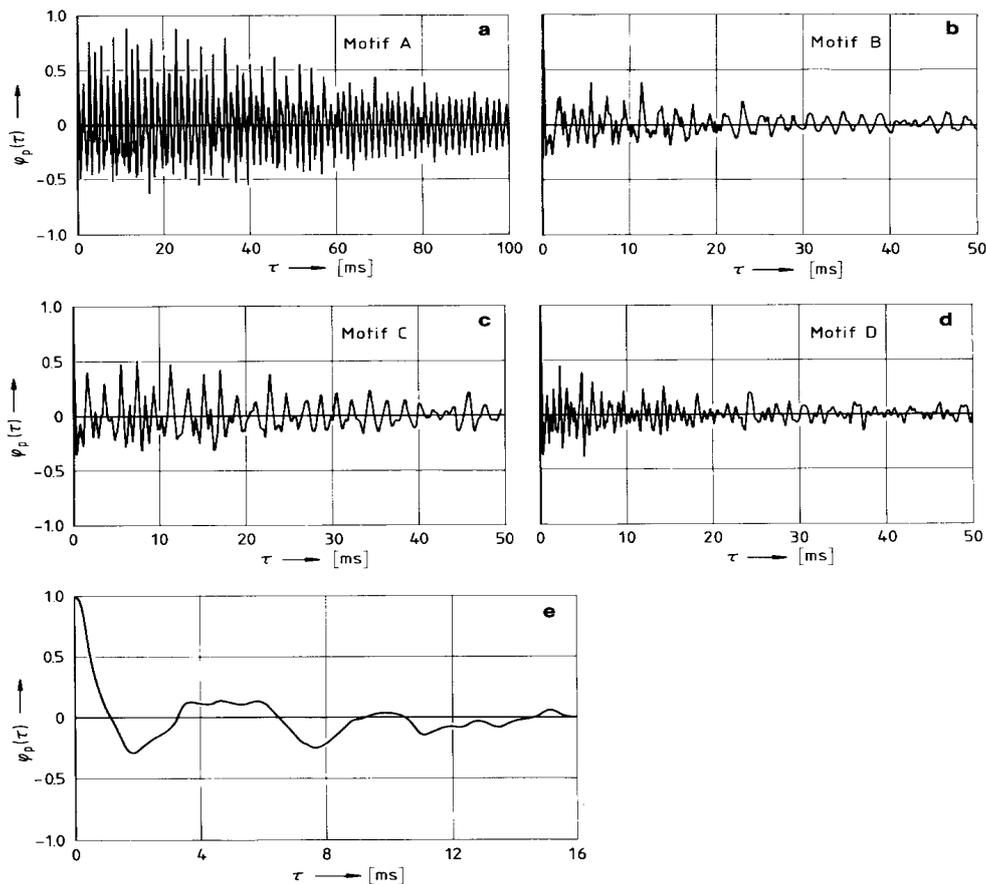
Procedendo dalla lettera A verso la K si hanno segnali (brani musicali) via via più ricchi di note e più rapidi. Si passa, infatti, da un *pavane* di Gibbons (una sviolinata settecentesca) al IV movimento della sinfonia K-V 551 Jupiter di Mozart (criticata alla presentazione come musica eccessivamente ricca di note). Gli andamenti delle funzioni di autocorrelazione sono riportati nella Figura 48.

Le funzioni di autocorrelazione per alcuni tipi di brani musicali e per una lettura di una poesia sono riportate in figura. Il **tempo di autocorrelazione** è quello necessario a far ridurre il valore della funzione di autocorrelazione all'1% del valore massimo. Un tempo di correlazione basso indica la necessità di una maggiore rapidità nella comprensione del segnale. **Il parlato ha tempi di autocorrelazione più bassi rispetto ai brani musicali** e per questo motivo i brani più rapidi hanno tempi più ridotti dei brani lenti.

Il brano a) (*pavane* del settecento) ha un tempo di autocorrelazione di circa 100 ms, il brano b) (*brano sinfonico lento*) circa 50 ms, il brano d) (tratto dalla *Jupiter* di Mozart) ancora 50 ms mentre la lettura della poesia, brano e), presenta un  $t=15$  ms.

Sound source*	Title	Composer or writer	$\tau_e^{\dagger}$ [ms]	$(\tau_e)_{\text{min}}^{\ddagger}$
Music Motif A	Royal Pavane	Orlando Gibbons	127 (127)	125
Music Motif B	Sinfonietta, Opus 48; IV movement	Malcolm Arnold	43 (35)	40
Music Motif B(L + R)	Sinfonietta, Opus 48; IV movement	Malcolm Arnold		45
Music Motif C	Symphony No. 102 in B flat major; II movement	Franz J. Haydn	(65)	
Music Motif C(L + R)	Symphony No. 102 in B flat major; II movement	Franz J. Haydn		70
Music Motif D	Siegfried Idyll; Bar 322	Richard Wagner	(40)	
Music Motif E	Symphony in C major, K-V, no. 551, IV movement	Wolfgang A. Mozart	38	
Music Motif F	§	Tsuneko Okamoto	105	
Music Motif G	§	Tsuneko Okamoto	145	
Music Motif K	Karesansui	Hozan Yamamoto	220	35
Speech S	Poem read by a female	Doppo Kunikida	10 (12)	

Tabella 7: Brani musicali analizzati da Y. Ando



**Fig. 2.2a – e.** Measured autocorrelation functions of music [2.4] and speech [2.5]. The effective duration of autocorrelation function is defined by the delay  $\tau_e$  at which the envelope of the normalized autocorrelation function becomes 0.1. (a) Music motif A, Royal Pavane by Gibbons,  $\tau_e = 127$  ms; (b) music motif B, Sinfonietta, Opus 48, III movement by Malcolm Arnold,  $\tau_e = 35$  ms; (c) music motif C, Symphony No. 102 in B flat major, II movement: Adagio by Haydn,  $\tau_e = 65$  ms; (d) music motif D, Siegfried Idyll, Bar 322 by Wagner,  $\tau_e = 40$  ms; (e) Continuous speech, a female reading a poem,  $\tau_e = 12$  ms

Figura 48: Tempi di autocorrelazione dei brani di Y. Ando

I brani F e G della Tabella 7 sono musiche di T. Okamoto e sono riportati a fianco sia lo spartito che l'andamento delle funzioni di autocorrelazione.

Y. Ando ha poi definito la funzione di correlazione incrociata fra orecchio sinistro e destro, detta IACC, che risulta molto importante per la definizione della qualità acustica di una sala.

Motif F



Motif G



(a)

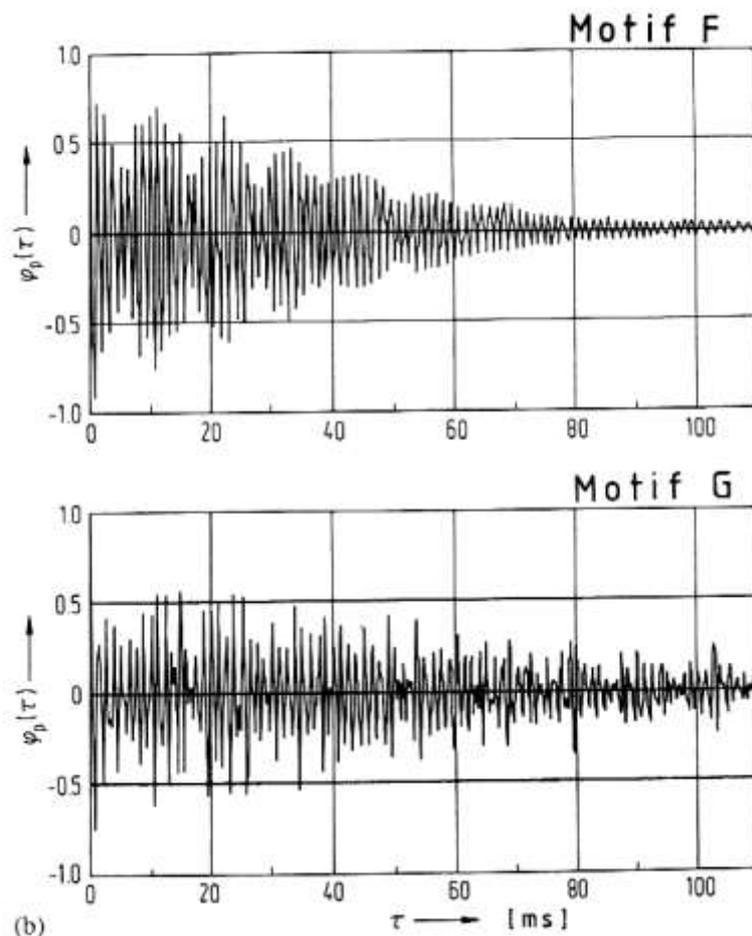



Figura 49: Brani F e G di Y. Ando e loro funzioni di autocorrelazione

## 4. TRASMISSIONE DEL SUONO

Il suono interagisce con la materia in vari modi. La conoscenza di queste interazioni è fondamentale per tutte le applicazioni tecniche, ad esempio, per gli schermi acustici, per l'acustica delle sale, per l'isolamento acustico degli ambienti.

### 4.1. TRASMISSIONE DEL SUONO

La trasmissione del suono è determinata da tre effetti fondamentali:

- L'assorbimento,
- La riflessione
- La trasmissione attraverso il mezzo.

Si tralascia qui la diffrazione generata allorché le dimensioni fisiche del corpo sono multiple o sottomultiple della lunghezza d'onda incidente.

### 4.2. ASSORBIMENTO, RIFLESSIONE, RIVERBERAZIONE, DIFFRAZIONE E RIFRAZIONE

Fino ad ora abbiamo parlato del suono utilizzando tre elementi fondamentali per la sua propagazione: il trasmettitore, il mezzo e il ricevitore. Ora però proviamo a vedere cosa succede se nel proprio cammino l'onda sonora incontra un ostacolo qualsiasi.

Prendiamo una parete che separi il mezzo di trasmissione in due ambienti (Figura 50), l'energia sonora costituente il suono colpendo la parete si distribuisce in modo tale che una prima

frazione di energia viene riflessa e rinviata al primo ambiente, un'altra frazione penetra nella parete e per particolari proprietà elastiche della parete stessa può essere restituita al primo ambiente, una terza parte si trasmette all'interno della parete con una velocità dipendente dal materiale stesso e viene trasformata in energia termica, una quarta parte attraversa la parete e passa al secondo ambiente seguendo la via di piccole o grandi cavità presenti nel materiale oltre che per vibrazione della parete stessa.

Il bilancio energetico dell'energia sonora incidente su di una parete ci permette di capire quali fenomeni interagiscono nella propagazione del suono attraverso un ostacolo.

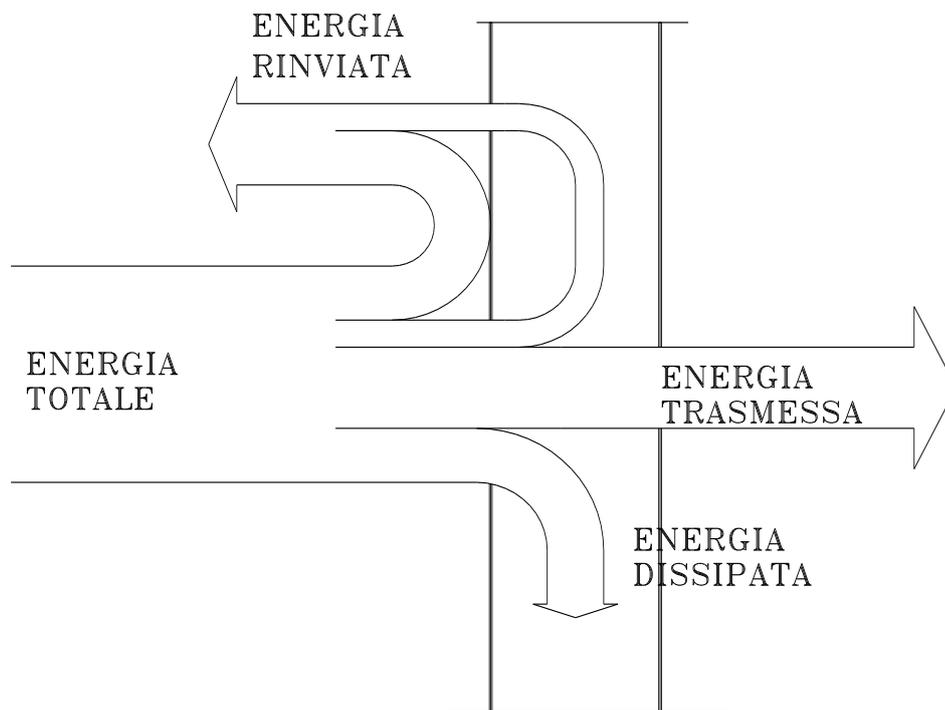


Figura 50: Bilancio di energia sonora

#### 4.2.1. ASSORBIMENTO

Come abbiamo detto precedentemente una parte di energia sonora penetra all'interno dell'ostacolo e viene dissipata trasformandosi in calore. La percentuale di energia assorbita dalla parete si chiama fattore di *assorbimento*.

Il fattore assorbimento di un materiale dipende dalla natura del materiale stesso, dalla frequenza del suono incidente e dell'angolo di incidenza con cui le onde sonore colpiscono l'ostacolo, vedi Figura 51.

Un materiale poroso e flessibile è più assorbente di un materiale rigido e compatto, la porosità permette all'onda sonora di produrre delle oscillazioni di pressione all'interno dei pori cosicché il movimento dell'aria presente in essi provoca attrito e quindi una dissipazione di energia sotto forma di calore.

Solitamente questo meccanismo permette l'assorbimento delle alte frequenze, mentre quelle più basse, mettendo in vibrazione il materiale stesso provocano la dissipazione per calore dell'energia prodotta per vibrazione.

**Materiali compatti.**

Le pareti spesse, costituite da mattoni pieni o da calcestruzzo, lisce e

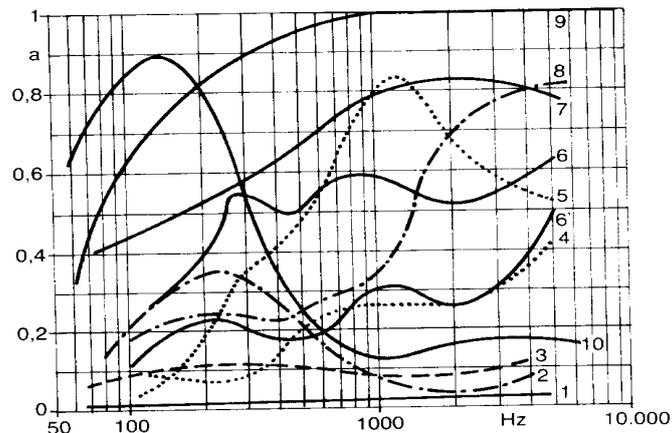


Fig. 2.23 – Fattori di assorbimento apparente.

1. Muro intonacato, spess. cm 45. - 2. Rivestimento in legno compensato,  $s = 3$  mm, intercapedine d'aria di cm 5. - 3. Rivestimento in legno liscio,  $s = 16$  mm, su telaio di 35 mm di interasse. - 4. Tappeto di pelo,  $s = 10$  mm, su pavimento di cemento. - 5. Velluto drappeggiato, massa  $0,47 \text{ kg/m}^2$ . - 6. Lastre di pasta di legno,  $s = 18$  mm. - 6'. id.,  $s = 6$  mm. - 7. Lana di vetro. - 8. Lastre di fibre di legno,  $s = 20$  mm. - 9. Pubbico fitto. - 10. Rivestimento in legno compensato,  $s = 3$  mm, intercapedine di cm 5 con lana di vetro inserita.

Figura 51: Andamento di alcuni fattori di assorbimento per materiali da costruzione.

#### 4.2.2. RIFLESSIONE

Considerando una superficie riflettente di grandi dimensioni rispetto all'onda sonora, la riflessione del suono segue le stesse leggi fisiche della riflessione della luce.

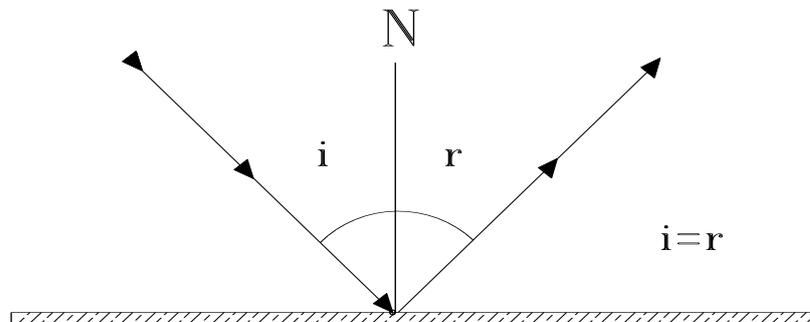


Figura 52: Riflessione di un'onda sonora

Così gli angoli formati dall'onda sonora incidente con l'onda sonora riflessa e la normale alla superficie sono uguali.

#### 4.2.3. TRASMISSIONE E POTERE FONOIOLANTE

La frazione di energia trasmessa dalla parete è data dal *fattore di trasmissione*. Spesso, però, si utilizza una grandezza ad esso correlata detta *Potere Fonoisolante* ( $R$ ) e che è definita come:

$$R = 10 \text{Log} \frac{1}{t} \quad [53]$$

Di questa grandezza si parlerà a proposito dei requisiti acustici degli edifici.

Se indichiamo con  $L_1$  ed  $L_2$ , vedi Figura 53, i livelli nell'ambiente dove è presente la sorgente e nell'ambiente contiguo, con  $S$  la superficie del tramezzo divisorio, allora si può scrivere, a regime stazionario, il seguente bilancio energetico:

$$I_1 S t = \sum_{i=1}^n a_i S_i \quad [54]$$

cioè che la potenza trasmessa dall'ambiente 1 contenente la sorgente sonora ( $I_1 S t$ ) sia pari alla potenza sonora assorbita dalle pareti presenti nell'ambiente 2. Applicando la definizione [53] e ricordando la definizione di livello di intensità sonora si ottiene la relazione:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \text{Log} \frac{S}{\sum a_i S_i} \quad [55]$$

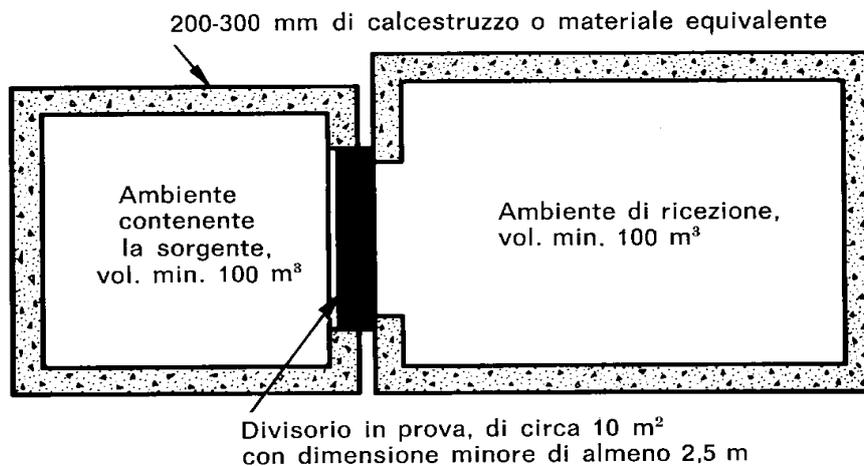


Figura 53: valutazione del potere fonoisolante di un divisorio

Nelle tabelle seguenti sono riportati i valori del potere fonoisolante per alcuni materiali di uso comune. Osservando i dati relativi ai vari materiali si può tracciare un andamento tipico del potere fonoisolante dato nella Figura 54.

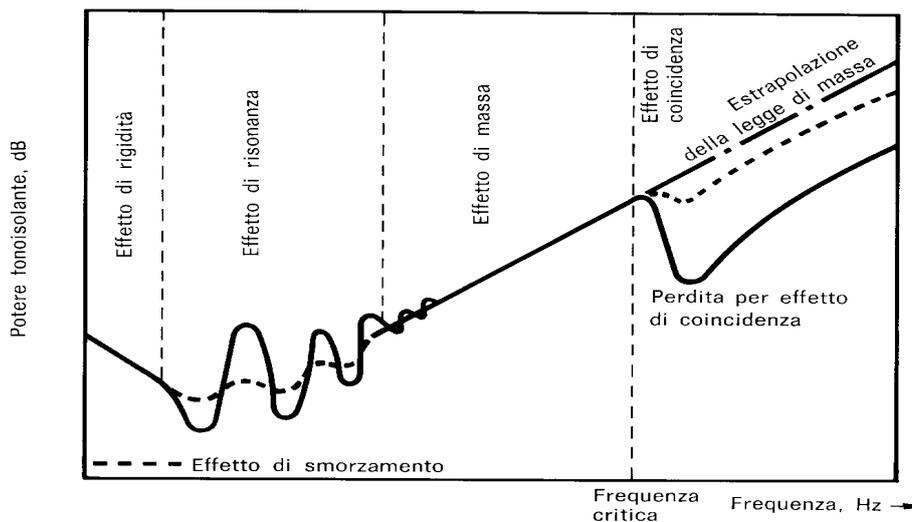


Figura 54: Andamento del potere fonoisolante

Alla basse frequenze si hanno fenomeni dissipativi dovute alle frequenze proprie dei materiali e pertanto in questa zona si utilizzano nelle applicazioni.

Nella zona centrale si ha un andamento lineare e il potere fonoisolante cresce linearmente con il logaritmo della frequenza (*legge di massa*):

$$R = 18 \text{Log}(\sigma f) - 42.5 \quad [56]$$

ove  $\sigma$  è la densità superficiale del materiale ed  $f$  la frequenza considerata. In Letteratura si hanno diverse relazioni che tengono conto di alcune peculiarità quali l'angolo di incidenza delle onde acustiche, il campo acustico (sferico o piano).

Si rimanda ai Manuali specializzati per altri riferimenti ed approfondimenti. Si osservi che in base alla [56] ad un raddoppio della frequenza corrisponde un incremento di:

$$18 * \text{Log}(2) = 5.4$$

del potere fonoisolante. Spesso si arrotonda questo incremento in 6 dB. Ne segue che se si conosce il potere fonoisolante alla frequenza di 1000 Hz allora si ottiene il valore a 500 Hz sottraendo 6 dB e quello a 2000 Hz aggiungendo 6 dB al valore iniziale.

Quest'osservazione risulta utile nelle applicazioni pratiche quando si progetta un isolamento acustico mediante una parete isolante.

A frequenze elevate, in corrispondenza di una *frequenza critica* per ciascun materiale, si manifesta una riduzione marcata del potere fonoisolante dovuto ad effettivi di coincidenza.

In tabella sono riportate le masse superficiali e le prime frequenze critiche di alcuni materiali.

La legge di massa teorica trova riscontro nella realtà solo a tratti, come indicato nella figura seguente. I materiali hanno frequenze di risonanza a varie frequenze.

**TABELLA 6.1**  
**Frequenze critiche e masse per unità di superficie**  
**di alcuni materiali d'uso corrente**

<i>Materiale</i>	<i>Frequenza critica per massa per unità di superficie Hz · kg · m<sup>-2</sup></i>	<i>Massa per unità di superficie per unità di spessore kg · m<sup>-2</sup> · mm<sup>-1</sup></i>
Piombo	600.000	11,2
Acciaio	97.700	8,1
Calcestruzzo armato	44.000	2,3
Mattone	42.000	1,9
Vetro	39.000	2,5
Perspex	35.000	1,15
Cemento-amianto	33.600	1,9
Alluminio	32.200	2,7
Masonite	30.600	0,81
Lastra di gesso	32.000	0,75
Compensato	13.000	0,58

*Tabella 8: Frequenze critiche per alcuni materiali*

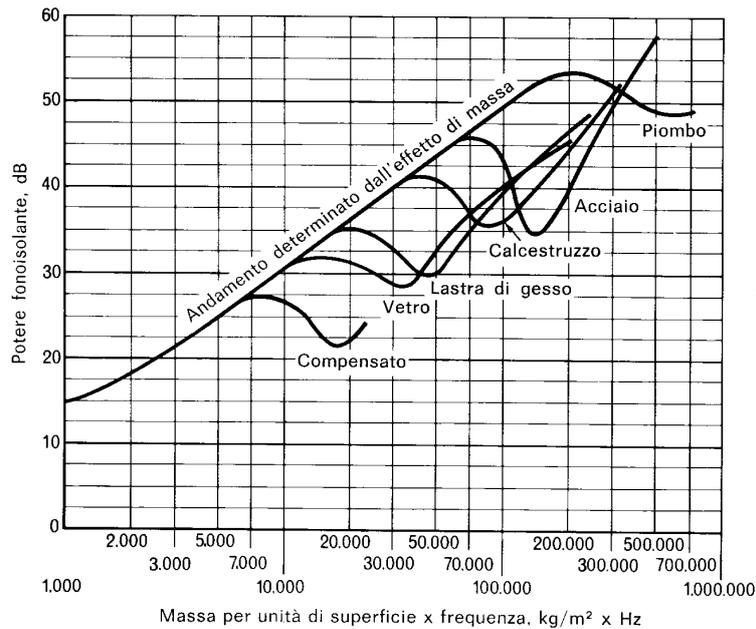


Figura 55: Frequenze critiche di alcuni materiali

### 4.3. ASSORBIMENTO DEL SUONO ALLE BASSE FREQUENZE

Alle basse frequenze il potere fonoisolante dei vari materiali è basso o addirittura oscillante. Per isolarci dalle basse frequenze dobbiamo allora utilizzare altri effetti fisici diversi dal potere fonoisolante anzidetto. In genere si tratta di fenomeni di risonanza dovuta a piccole cavità (*risuonatori di Helmholtz*) o di lastre piane che generano vibrazioni di massima ampiezza di carattere dissipativo.

Tipo di struttura	Spessore mm	Massa per unità di superficie kg/m <sup>2</sup>	Potere fonoisolante secondo la frequenza (Hz)							
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
<i>Pareti semplici in muratura</i>										
Mattoni pieni, con intonaco su entrambi i lati	125	240	30	36	37	40	46	54	57	59
Mattoni pieni, con intonaco su entrambi i lati	255	480	34	41	45	48	56	65	69	72
Mattoni pieni, con intonaco su entrambi i lati	360	720	36	44	43	49	57	66	70	72
Blocchi di clinker, 12 mm d'intonaco su ogni lato	125	145	20	27	33	40	50	57	56	59
Blocchi di clinker, non intonacati	75	85	12	17	18	20	24	30	38	43
Blocchi forati in calcestruzzo di scorie, tinteggiati con cementite	100	75	22	30	34	40	50	50	52	53
Blocchi forati in calcestruzzo di scorie, non tinteggiati	100	75	22	27	32	37	40	41	45	48
Blocchi in « Thermalite »	100	125	20	27	31	39	45	53	38	62
Mattoni di vetro	200	510	25	30	35	40	49	49	43	45
<i>Pareti doppie in muratura</i>										
Mattoni pieni, con intercapedine d'aria di 56 mm, e 12 mm d'intonaco per lato										
— con traversine in profilato metallico	300	380	28	34	34	40	56	73	76	78
— con traversine in lamiera stirata	300	380	27	27	43	55	66	77	85	85
<i>Pareti divisorie su telaio in legno</i>										
Lastre isolanti da 12 mm fissate su montanti di 50 mm × 100 mm	125	19	12	16	22	28	38	50	52	55
Lastre di gesso da 9 mm, con intonaco di 12 mm sulle superfici esterne, fissate su montanti di 50 mm × 100 mm	142	60	20	25	28	34	47	39	50	56

Tabella 9: Potere fonoisolante di alcuni materiali

VALORI DEL POTERE FONOISOLANTE DI ALCUNE STRUTTURE D'USO CORRENTE

Tipo di struttura	Spessore mm	Massa per unità di superficie kg/m <sup>2</sup>	Potere fonoisolante secondo la frequenza (Hz)							
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
<i>Pannelli semplici</i>										
Lastra di piombo	1,5	17	22	28	32	33	32	32	33	36
» » »	3	34	25	30	31	27	38	44	33	38
Lamiera d'alluminio nervata	0,9	2,5	8	11	10	10	18	23	25	30
Lamiera zincata	0,55	6	3	8	14	20	23	26	27	35
» »	0,9	7	3	8	14	20	26	32	38	40
» »	1,2	10	8	13	20	24	29	33	39	44
» »	1,6	13	9	14	21	27	32	37	43	42
Lamiera grecata, irrigidita ai bordi	1,2	39	25	30	20	22	30	28	31	31
Lastra ondulata in conglomerato d'amianto	6	10	20	25	30	33	33	38	39	42
Truciolato su telaio di legno	19	11	14	17	18	25	30	26	32	38
Fibro-legno su telaio di legno	12	4	10	12	16	20	24	30	31	36
Lastra di gesso su telaio di legno	9	7	9	15	20	24	29	32	35	38
Compensato su telaio di legno	6	3,5	6	9	13	16	21	27	29	33
Pannello di legno (mogano)	50	25	15	19	23	25	30	37	42	46
Tavolato di legno non intonato	25	19	0	0	2	6	6	8	8	10
Fibro-legno con 12 mm di intonaco su entrambi i lati	50	75	18	23	27	30	32	36	39	43
<i>Pannelli composti</i>										
Lastra di piombo da 1,5 mm tra due lastre di compensato da 5 mm	11,5	25	19	26	30	34	38	42	44	47
Lastra in conglomerato d'amianto da 9 mm tra due lamiere d'acciaio da 1,2 mm	12	37	16	22	27	31	27	37	44	48
« Stramit » (paglia compressa tra due lastre di masonite da 3 mm)	56	25	15	22	23	27	27	35	35	38

Tabella 10: Potere fonoisolante di alcuni materiali

Tipo di struttura	Spessore mm	Massa per unità di superficie kg/m <sup>2</sup>	Potere fonoisolante secondo la frequenza (Hz)							
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
<i>Finestre con vetro semplice</i>										
Lastra di vetro semplice in telaio pesante	6	15	17	11	24	28	32	27	35	39
	8	20	17	18	25	31	32	28	36	39
	9	22,5	18	22	26	31	30	32	39	43
	16	40	20	25	28	33	30	38	45	48
	25	62,5	25	27	31	30	33	43	48	53
<i>Finestre con doppi vetri</i>										
Vetri da 2,5 mm con 7 mm di intercapedine	12	15	15	22	16	20	29	31	27	30
Vetri da 6 mm in telai separati, con 50 mm di intercapedine	62	34	18	25	29	34	41	45	53	50
Vetri da 6 mm in telai separati, con 100 mm di intercapedine	112	34	20	28	30	38	45	45	53	50
Vetri da 6 mm in telai separati, con 188 mm di intercapedine	200	34	25	30	35	41	48	50	56	56
Vetri da 6 mm in telai separati, con 188 mm di intercapedine con superfici perimetrali interne rivestite di materiale fonoassorbente	200	34	26	33	39	42	48	50	57	60
Vetri da 6 e 9 mm in telai separati, con 200 mm di intercapedine, con superfici perimetrali interne rivestite di materiale fonoassorbente	215	42	27	36	45	58	59	55	66	70
<i>Porte</i>										
Comune porta tamburata normalmente incernierata	43	9	9	12	13	14	16	18	24	26
Porta in legno massiccio, normalmente incernierata	43	28	13	17	21	26	29	31	34	32
Tipica porta 'acustica' costituita da doppia lamiera di acciaio, con materiale fonoassorbente nell'intercapedine, serrature speciali e sigillatura sulle battute; telaio pesante in acciaio	100	—	37	36	39	44	49	54	57	60

Tabella 11: : Potere fonoisolante di alcuni materiali

Tipo di struttura	Spessore mm	Massa per unità di superficie kg/m <sup>2</sup>	Potere fonoisolante secondo la frequenza (Hz)							
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
<i>Pavimenti</i>										
Assito in legno con giunti sigillati	21	13	17	21	18	22	24	30	33	63
Idem, rivestito inferiormente con lastre di gesso da 12 mm, intonacate a spruzzo, spessore 3 mm	235	31	15	18	25	37	39	45	45	48
Idem, ma « galleggiante » su lana di vetro	240	35	20	25	33	38	45	56	61	64
Cemento armato	100	230	32	37	36	45	52	59	62	63
	200	460	36	42	41	50	57	60	65	70
	300	690	37	40	45	52	59	63	67	72
Cemento armato da 125 mm ma « galleggiante »	190	420	35	38	43	48	54	61	63	67

Tabella 12: Potere fonoisolante di alcuni materiali

### 4.3.1. IL RISUONATORE DI HELMOLTZ

Una cavità può comportarsi come un risonatore di Helmholtz con frequenza di risonanza data dalla relazione:

$$f_{\text{ris}} = 55 \sqrt{\frac{S}{l \cdot V}} \quad [57]$$

in Hz, con:

- S area della sezione del collo, m<sup>2</sup>
- l lunghezza del collo, m
- V volume dell'aria contenuta nel volume, m<sup>3</sup>.

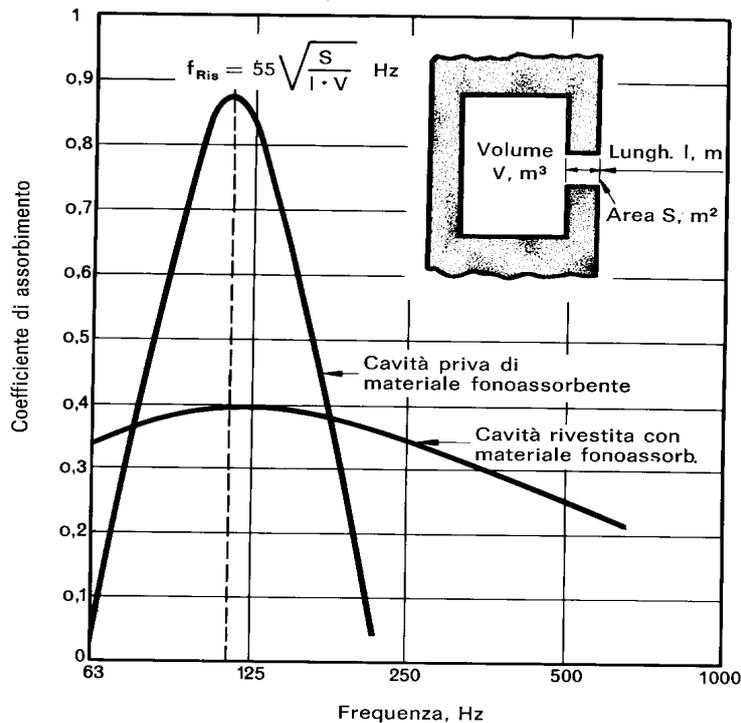


Figura 56: Cavità risonante

Scegliendo opportunamente i parametri geometrici si può avere una curva di assorbimento a basse frequenze. Un utilizzo delle cavità risonanti si ha con materiali edilizi usuali, come indicato nella seguente figura.

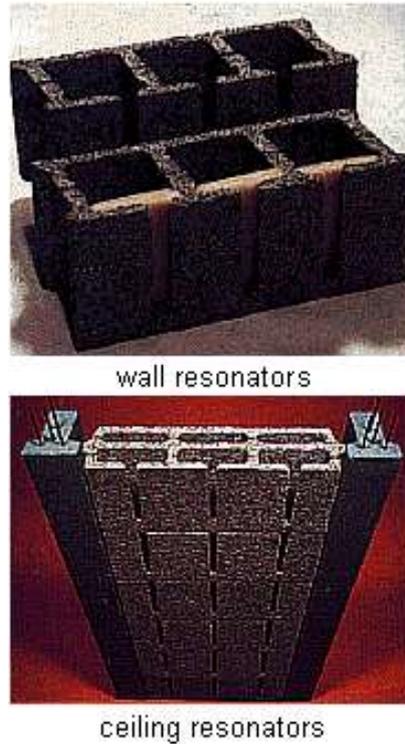


Figura 57: Materiale da costruzione utilizzato come cavità risonante

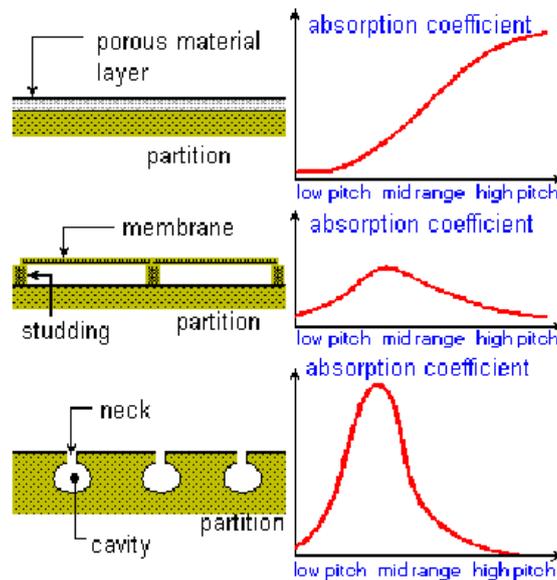


Figura 58: Tipologie di cavità risonanti di utilizzo comune

### 4.3.2. LE MEMBRANE ASSORBENTI

Alle basse frequenze si possono utilizzare lastre di compensato o masonite opportunamente fissate alle pareti le quali presentano una frequenza di risonanza data da:

$$f_{ris} = 60 \sqrt{\frac{1}{\sigma \cdot l}} \quad , \text{ in Hz} \quad [58]$$

con:

$\sigma = \rho_2 s$  massa superficiale del pannello,  $kg/m^2$

$l$  profondità dell'intercapedine d'aria.

Dimensionando opportunamente le membrane e scegliendo bene i materiali (di solito il legno) si può avere un picco di assorbimento alle basse frequenze, come illustrato nella figura seguente.

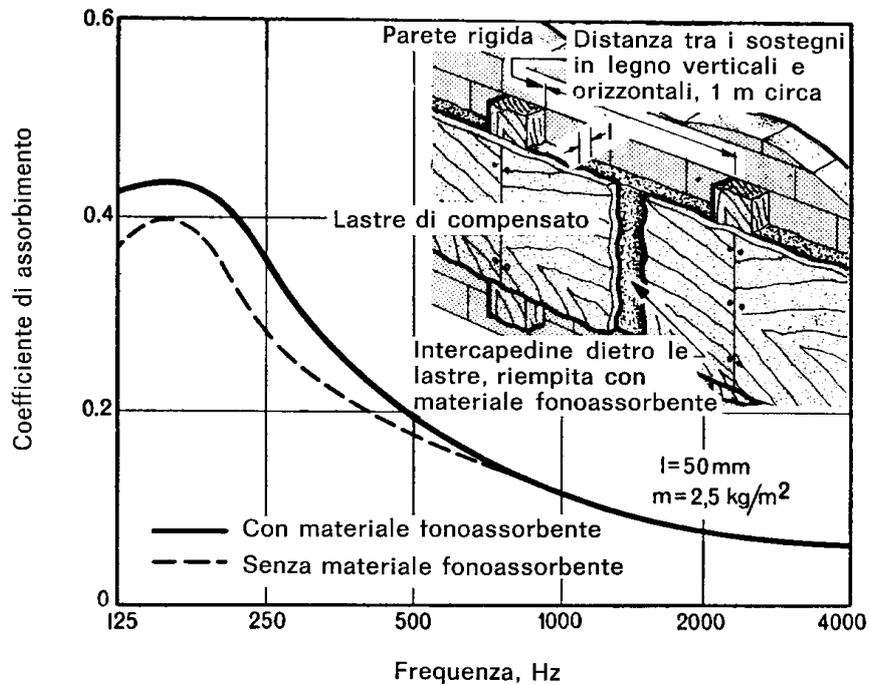


Figura 59: Assorbimento di una membrana

Nelle applicazioni pratiche le membrane sono realizzate con materiali gradevoli da vedere e che al tempo stesso forniscono l'assorbimento desiderato, come illustrato nella figura seguente.



Figura 60: Esempio di membrana assorbente realizzata con pannelli in legno

### 4.3.3. DIFFRAZIONE

La diffrazione è quel fenomeno che permette al suono di aggirare gli ostacoli e propagarsi anche al di fuori della visuale geometrica ed è del tutto analogo a quello che si verifica per le onde luminose.

Consideriamo per esempio una sorgente che emette onde sonore piane posta ad una certa distanza da una parete nella quale è stato praticato un foro: al di là della parete troveremo suono anche fuori dello spazio conico determinato dalla sorgente e dal contorno del foro.

In pratica succede che i punti interni al foro diventano sorgenti virtuali di onde sferiche.

Se il foro fosse più grande, l'onda piana, una volta attraversato il foro, tenderebbe a restare tale ad esclusione di una leggera curvatura alle sue estremità. La diffrazione risulta maggiore se le dimensioni del foro sono piccole rispetto alla lunghezza d'onda.

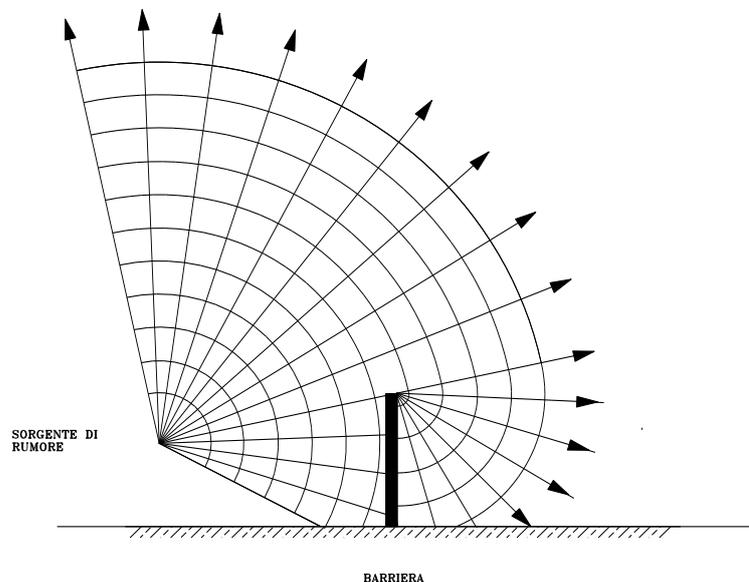


Figura 61: Diffrazione del suono da parte di un ostacolo

Il fenomeno della diffrazione serve a spiegare le zone d'ombra acustica: se un'onda sonora incontra un ostacolo una parte del suo fronte si infrange contro l'ostacolo mentre la parte che ne sfiora i contorni subisce una deviazione dalla linea di propagazione rettilinea (vedi figura) secondo le leggi della diffrazione. Se le dimensioni dell'ostacolo sono grandi rispetto alla lunghezza d'onda si crea, al di là di esso, una *zona d'ombra* piuttosto estesa; viceversa, quando la lunghezza d'onda del suono è confrontabile con la dimensione dell'ostacolo, la zona d'ombra risulta quasi inesistente.

### 4.3.4. BARRIERE ACUSTICHE

Durante la propagazione in ambiente esterno, le onde sonore incontrano sul loro cammino ostacoli di ogni tipo: filari di alberi, abitazioni, colline naturali o artificiali, recinzioni ecc.

Tutti questi elementi, se sono composti di materiali *"impermeabili"* al rumore, si comportano come barriere che si frappongono tra la sorgente e il ricevitore ed attenuano il livello sonoro ricevuto.

Naturalmente esistono notevoli differenze nella loro capacità di schermare le onde sonore a seconda dei materiali di cui sono composte, della loro posizione e forma.

L'attenuazione per un barriera rigida e rettilinea che si trova tra il ricevitore e la sorgente è data dalla formula:

$$(A)_{\text{barriera}} = 5 + 20 \log \frac{\sqrt{2\pi N}}{\operatorname{tgh} \sqrt{2\pi N}} \text{ dB} \quad [59]$$

dove  $N$  è il numero di *Fresnel* esprimibile come

$$N = \pm \frac{2}{\lambda} (A + B) - (R + D) \quad [60]$$

·  $\lambda$  è la lunghezza d'onda.

Con riferimento alla Figura 62,  $(A + B)$  e  $(R + D)$  sono rispettivamente la distanza più breve al di sopra della barriera e quella più breve in linea retta tra sorgente e ricevitore.

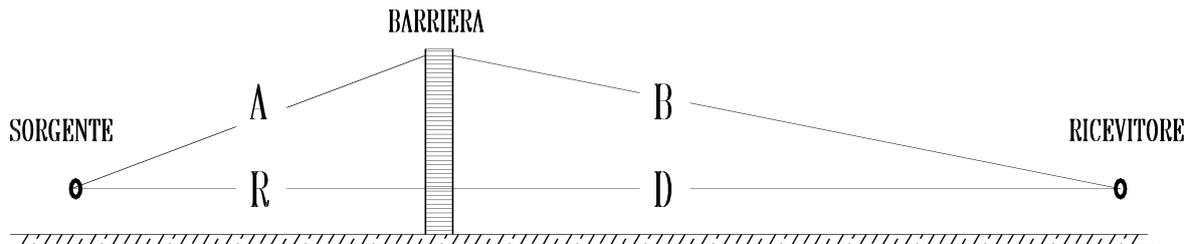


Figura 62: Schema di barriera

Come si vede dalla formula al variare di  $N$  varia l'attenuazione della barriera: per  $-0.2 \leq N \leq 0$  il numero di Fresnel va espresso in valore assoluto e la tangente iperbolica diventa trigonometrica.

Per  $N < -0.2$  l'attenuazione della barriera è nulla.

L'efficacia della barriera varia in misura diretta a  $N$ ; più grande è il numero di Fresnel maggiore risulta l'attenuazione anche se questo avviene soprattutto alle alte frequenze.

Alcuni accorgimenti per aumentare l'efficacia della barriera possono essere il rivestimento della barriera dalla parte rivolta verso la sorgente e il rivestimento della sommità per attenuare la trasmissione per diffrazione.

#### 4.3.5. LA RIFRAZIONE

Un'onda sonora che attraversa due mezzi di densità differente subisce una deviazione della traiettoria di propagazione (vedi figura) denominata *rifrazione*.

Questo fenomeno spiega perché un suono viene udito più facilmente di notte che di giorno: durante la giornata gli strati dell'atmosfera vicini al suolo sono più caldi e, dato che la velocità del suono cresce con la temperatura dell'aria, per rifrazione le onde sonore si allontanano dal suolo; di notte invece la situazione è opposta e le onde rifratte verso terra vanno ad aumentare l'intensità del suono percepito:

$$n_{1,2} = \frac{\operatorname{sen} i}{\operatorname{sen} r} = \frac{v_1}{v_2} \quad [61]$$

ove si ha:

- $n_{1,2}$  = indice di rifrazione
- $v_1$  = velocità del suono nel mezzo di trasmissione 1
- $v_2$  = velocità del suono nel mezzo di trasmissione 2

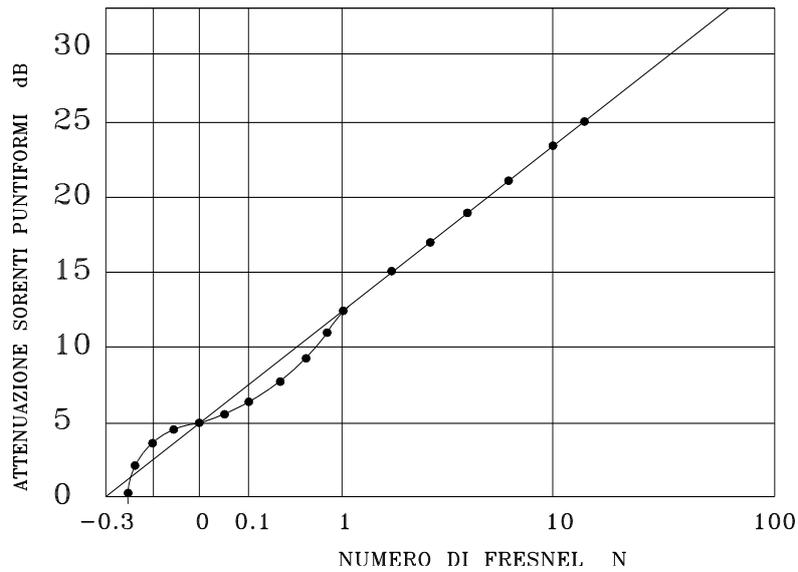


Figura 63: Andamento dell'attenuazione in funzione del numero di Fresnel

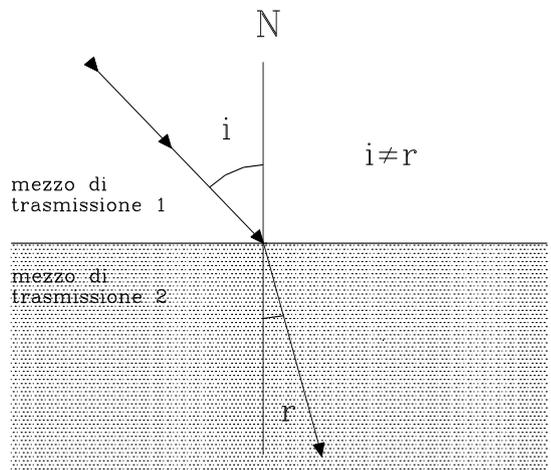


Figura 64: Rifrazione di un'onda sonora.

**4.3.6. FATTORE DI DIREZIONALITÀ**

Si definisce *Fattore di Direzionalità* di una sorgente sonora il rapporto fra l'intensità sonora misurata ad una certa distanza e in una certa direzione e il valore che essa avrebbe, a parità di distanza e di potenza emessa, nel caso in cui questa si comportasse come omnidirezionale.

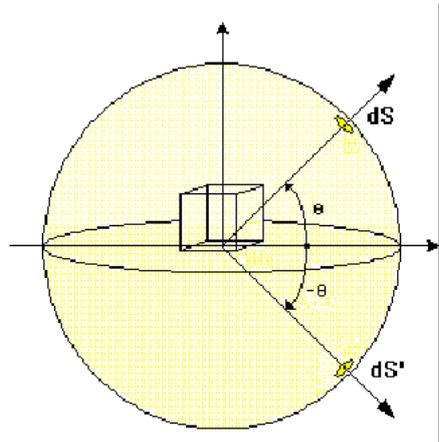


Figura 65: Definizione del fattore di direzionalità

Il *fattore di direzionalità* è dato dal rapporto:

$$Q = \frac{I_\phi}{I_0} = \frac{\frac{\bar{p}^2}{\rho c}}{\frac{W}{4\pi d^2}} \quad [62]$$

ove:

- $\bar{p}$  è il valore efficace della pressione,  $Pa$
- $I_\phi$  intensità acustica nella direzione  $\phi$ ,  $W/m^2$ ,
- $I_0$  intensità acustica di una sorgente omnidirezionale (sferica) di pari potenza,  $W/m^2$ ,
- $d$  distanza dalla sorgente,  $m$ .
- $W$  potenza della sorgente,  $W$
- $\rho c$  resistenza acustica dell'aria,  $Rayl$ .

Quanto definito ci consente di fare alcune importanti osservazioni:

- Se si dispone di una sorgente sonora puntiforme omnidirezionale davanti ad una parete piana allora la sua direttività diventa pari a 2 (si ha il rinforzo delle onde riflesse dalla parete che si somma alle onde dirette della sorgente) e il livello di potenza sonora cresce di 3 dB.
- Se si dispone la stessa sorgente in corrispondenza di un diedro formato da due pareti piane si ha una direttività pari a 4 e il livello di potenza sonora cresce di 6 dB.
- Se si dispone la stessa sorgente in corrispondenza di un angolo formato da tre pareti piane si ha una direttività pari a 8 e il livello di potenza sonora cresce di 9 dB.

Di queste facili osservazioni si deve tenere conto nel posizionare le sorgenti in un ambiente di lavoro. Disporle in vicinanza delle pareti significa incrementare la loro rumorosità di almeno 3 dB.

Meglio è disporle all'interno della sala. Se invece è proprio l'effetto di amplificazione che si desidera ottenere allora è bene cercare uno spigolo in modo da ottenere 9 dB di amplificazione gratuita.

E' proprio ciò che si fa nelle discoteche ponendo le casse in alto in corrispondenza degli spigoli della sala.

#### 4.4. RIVERBERAZIONE ACUSTICA

Se poniamo alcuni ascoltatori in una stanza con una sorgente emittente le onde sonore riflesse dalle pareti arrivano alle loro orecchie in successione così rapida che questi non riescono a percepire le onde sonore come ripetizioni distinte del suono originale, mentre saranno in grado di sentire il prolungamento del suono dopo che si è spenta la sorgente fino a che questa non sarà più udibile.

Il prolungamento del suono udito si chiama *riverberazione* (Vedi capitolo sull'Acustica delle Sale) ed è quel fenomeno per cui si ha la persistenza di un suono all'interno di uno spazio chiuso dovuta alle riflessioni o deviazioni dell'onda sonora contro le pareti, dopo che la sorgente ha terminato di trasmettere.

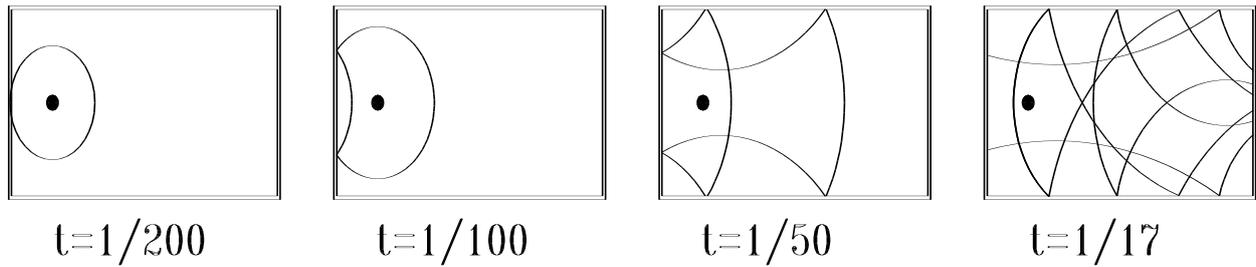


Figura 66: Propagazione di un'onda sonora all'interno di una stanza

In Figura 67 si ha la rappresentazione dei percorsi di 200 raggi acustici all'interno di un ambiente chiuso.

E' facile vedere, pur con l'esiguo numero di raggi considerato, quanto sia complesso seguire i singoli percorsi e come, seppure come induzione visiva, l'addensarsi dei raggi sonori porti ad avere una densità acustica pressoché uniforme in tutto il volume dell'ambiente.

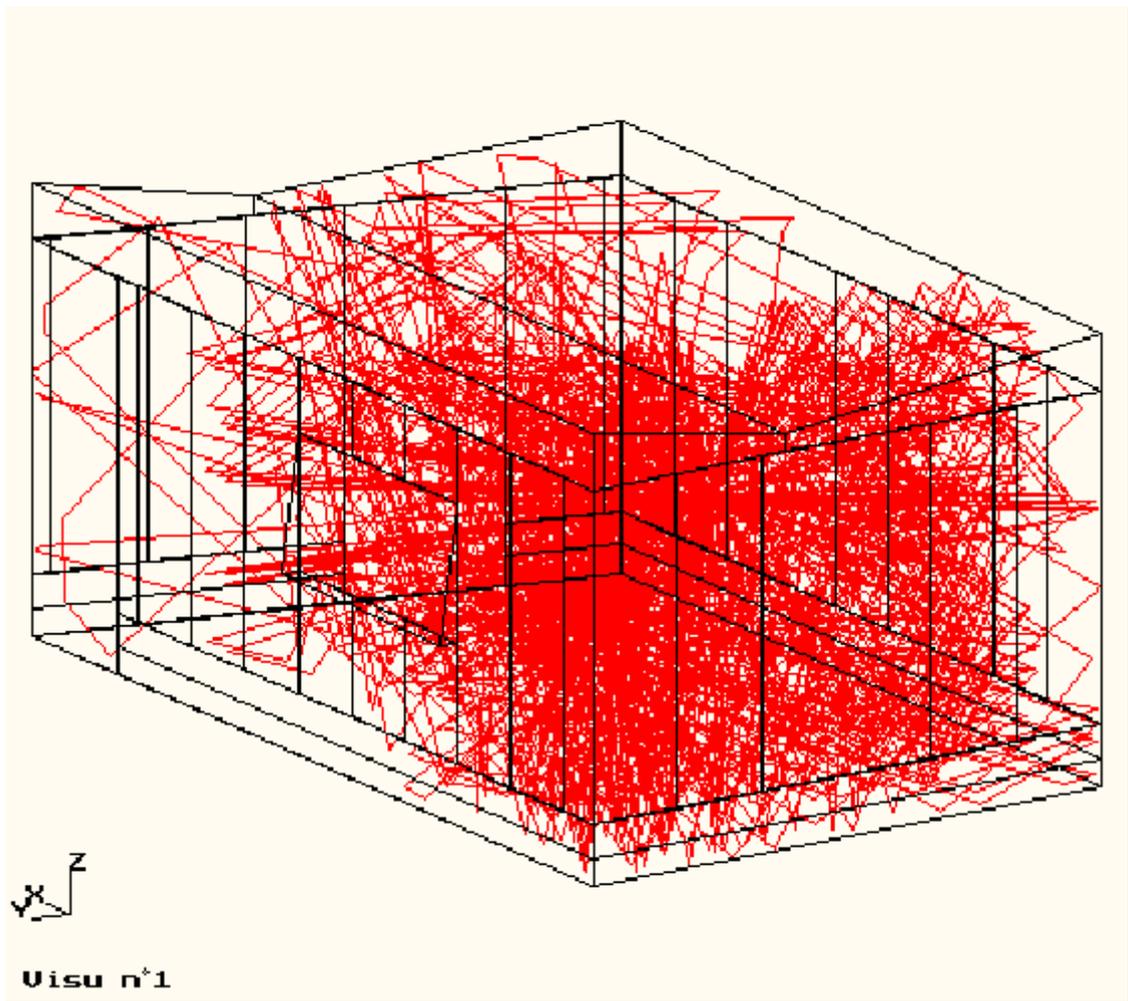
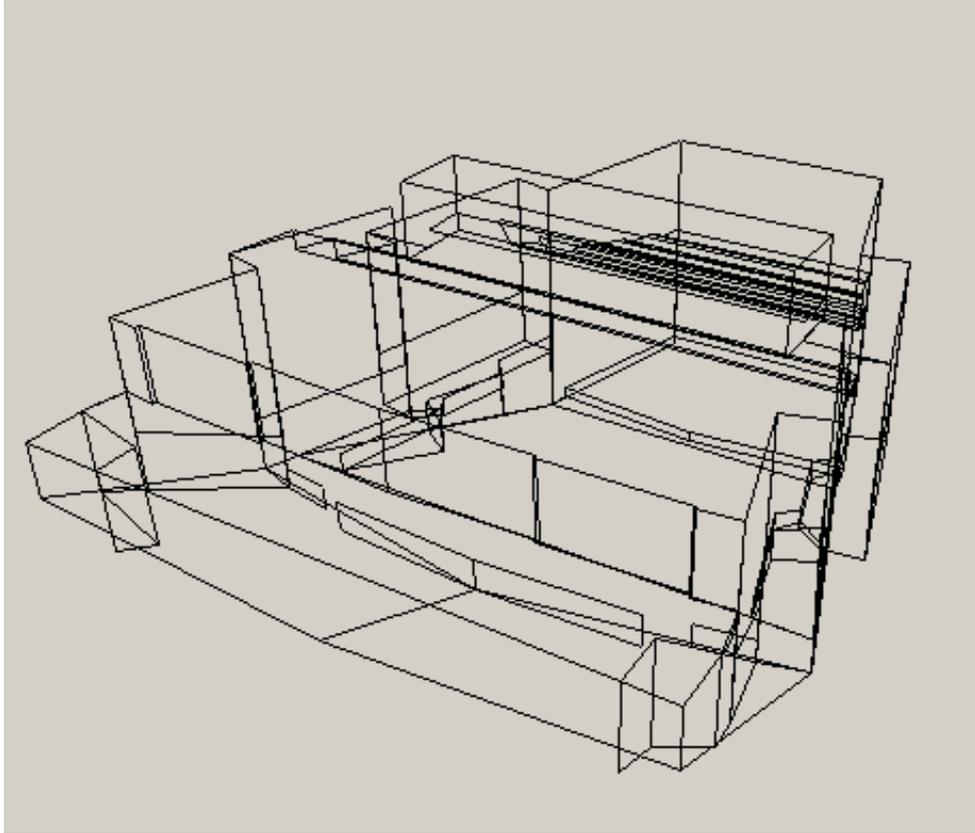
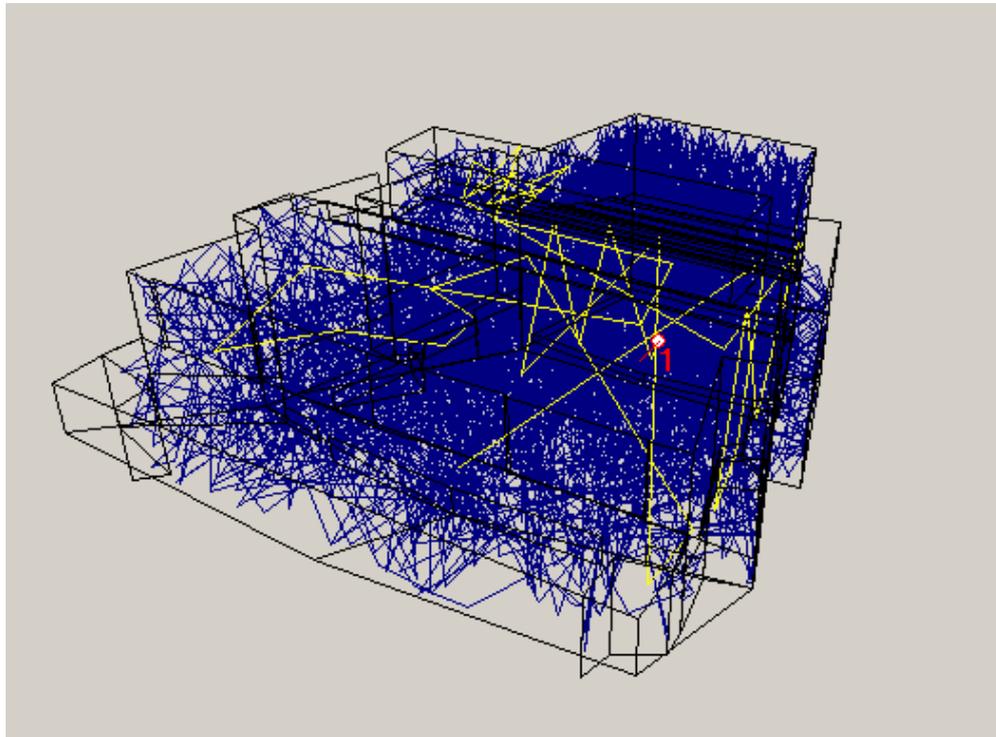


Figura 67: Schematizzazione di 200 raggi sonori riflessi in un ambiente chiuso



*Figura 68: Esempio di un teatro*



*Figura 69: Situazione delle riflessioni dopo 1 s dall'avvio della sorgente*

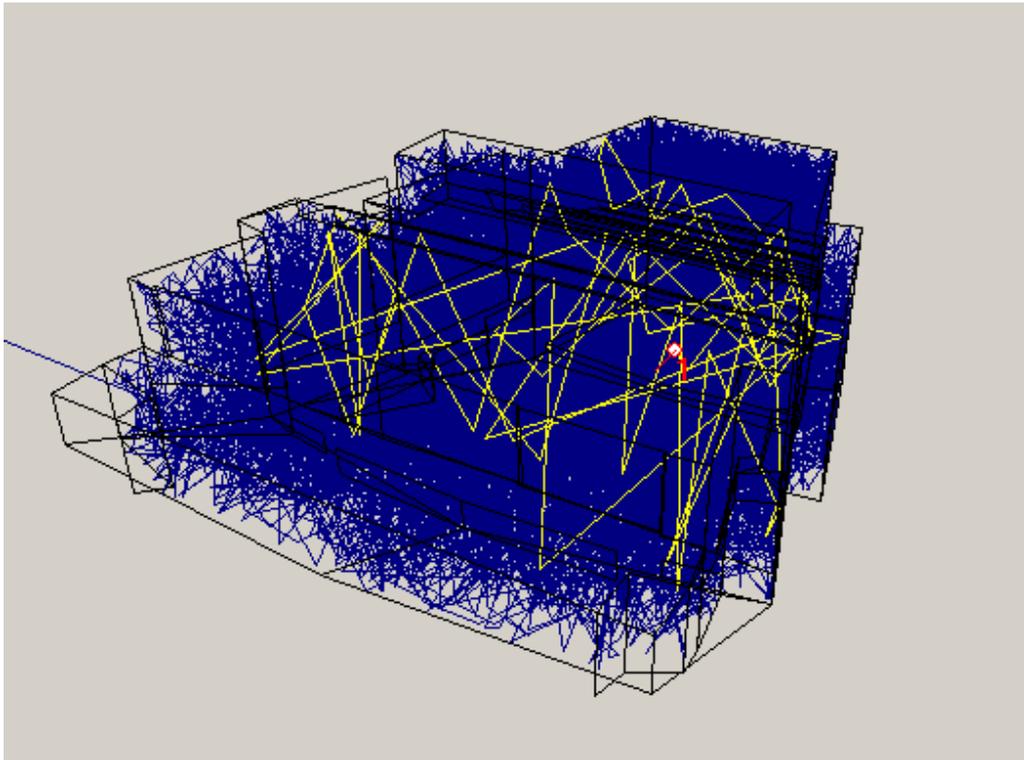


Figura 70: Situazione delle riflessioni dopo 2 s dall'avvio della sorgente

Analoga osservazione si può fare per il teatro di Figura 68 per il quale si sono considerate le riflessioni dopo 1 s dall'avviamento della sorgente sonora, come riportato in Figura 69. Anche in questo caso i raggi acustici hanno praticamente riempito lo spazio interno del teatro contribuendo ad uniformare la densità sonora all'interno. In Figura 70 si ha la situazione delle riflessioni dopo 2 s dall'avvio della sorgente sonora. Il confronto con la Figura 69 mostra una maggiore uniformità della densità sonora dovuta alla sovrapposizione delle riflessioni sonore.

In pratica la riverberazione acustica porta il suono ovunque all'interno degli ambienti chiusi e ciò indipendentemente dalla posizione relativa fra sorgente ed ascoltatore. Il campo acustico non è più geometricamente definito (ad esempio sferico, per sorgente puntiforme) bensì somma di innumerevoli riflessioni, come si può intuire anche dall'esame della Figura 66 e seguenti.

Nella Figura 71 si ha la rappresentazione schematica, detta *ecogramma*, delle onde riflesse in funzione del tempo.

In pratica si ha in ascissa il tempo trascorso dal suono diretto e in ordinate il livello corrispondente alla generica onda riflessa che arriva all'ascoltatore in una data posizione.

Proprio questa complessità del fenomeno è stata il freno principale all'evoluzione dell'Acustica delle Sale, come detto nell'Introduzione. W.C. Sabine ad inizio del secolo studiò la riverberazione acustica e pervenne ad una relazione sperimentale che porta il suo nome e che ancora oggi rappresenta uno dei parametri più significativi per definire l'acustica di una sala:

$$T_{60} = \frac{0.161 V}{\sum a_i S_i} \quad [63]$$

ove  $T_{60}$  è il tempo di riverberazione definito come *il tempo (in secondi) necessario a che l'intensità sonora scenda ad un milionesimo del valore iniziale, ovvero che scenda di 60 dB.*

Si ha:

- $a_i$  : fattore di Sabine (detto anche *apertura equivalente*) del materiale, cioè dalla somma del fattore di trasmissione e del fattore di assorbimento;
- $V$  : volume della sala ( $m^3$ );

·  $S_i$  : superficie della parete o dell'oggetto interno alla sala ( $m^2$ ).

Si definisce un fattore di assorbimento medio come media degli assorbimenti delle pareti ed oggetti pesata secondo le superfici:

$$a_m = \frac{\sum a_i S_i}{\sum S_i} \quad [64]$$

La relazione di Sabine vale quando la sala é di forma regolare, il volume é inferiore a 20.000 mc. Il fattore di assorbimento medio deve essere inferiore a 0,4.

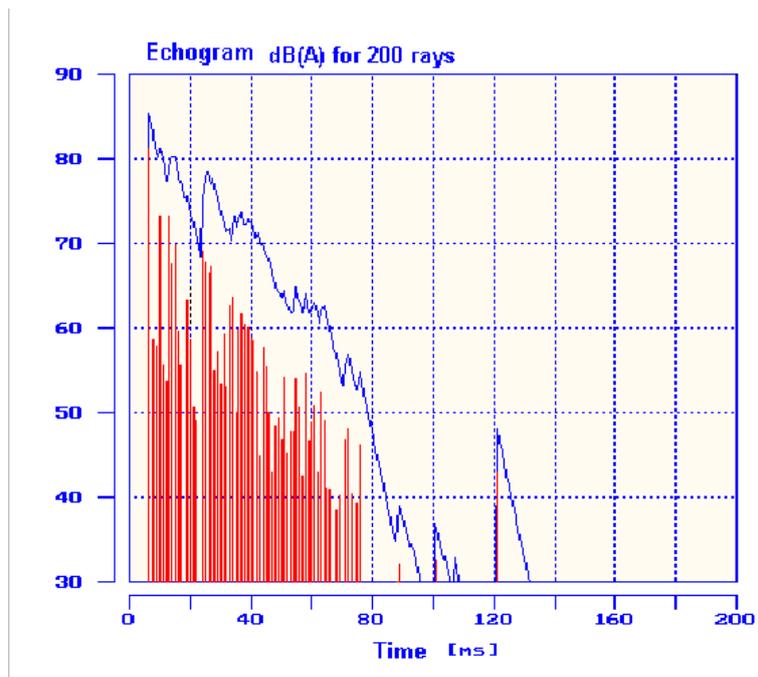


Figura 71: Ecogramma in una sala chiusa

Per una sala di forma regolare con una distribuzione di densità acustica uniforme e con assorbimento medio dei materiali non elevato (ipotesi di Sabine) si può osservare una curva di decadimento del tipo di quella rappresentata in Figura 72.

Il primo tratto viene ignorato perché fortemente influenzato da variazioni statistiche casuali. Il tempo di riverberazione é dato dall'intervallo in ascissa per cui si ottiene un abbassamento di 60 dB del livello sonoro.

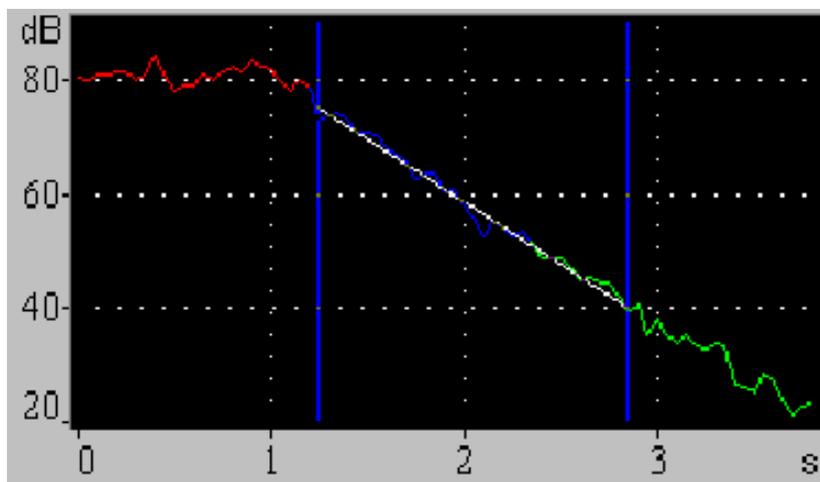


Figura 72: Decadimento sonoro all'interno di una sala

Oggi il controllo della riverberazione acustica (e di numerosi altri fenomeni che in questa sede si trascurano per brevità) porta a progettare, con l'ausilio di opportuni software acustici, in piena libertà, vedi la Figura 73, le nuove sale musicali.



Figura 73: Il Teatro Roy Thompson Hall, Toronto

Esse rappresentano un esempio mirabile dell'ingegno umano e sono certamente fra le opere di architettura e di ingegneria più complesse. Oggi siamo perfettamente in grado di *progettare* le sale tenendo conto di tutti i numerosi parametri funzionali che debbono essere rispettati oltre quelli acustici.

#### 4.5. ATTENUAZIONE DEI SUONI NELL'AMBIENTE INTERNO

Si consideri un ambiente confinato ed una sorgente sonora di potenza  $W$  (*Watt*), quale può essere, ad esempio, la potenza emessa da una macchina all'interno di uno stabilimento. Il livello sonoro in un punto distante  $d$  dalla sorgente e posto all'interno dell'ambiente chiuso è dato dalla somma del livello dovuto al campo diretto e quello del campo diffuso (riverberato).

Il primo dipende dall'inverso del quadrato della distanza mentre il secondo si può dimostrare che è indipendente dalla distanza e funzione solamente dall'assorbimento delle pareti del locale. In definitiva si ha la relazione:

$$L_p = L_w + 10 \text{Log} \left( \frac{Q}{4\pi d^2} + \frac{4}{R} \right) \quad [65]$$

con :

$$L_w = 10 \text{Log} \frac{W}{10^{-12}} \quad [66]$$

in *Watt*, e:

$$R = \frac{\sum S_i a_i}{1 - a_m} \quad [67]$$

ove è:

$$a_m = \frac{\sum a_i S_i}{\sum S_i} \quad [68]$$

che dalla relazione di Sabine [63] può anche scriversi:

$$a_m = \frac{0,161 \cdot V}{S \cdot T_{60}} \quad [69]$$

Pertanto i termini:

$$L_{p,d} = L_w + 10 \text{Log} \left( \frac{Q}{4\pi d^2} \right) \quad [70]$$

e:

$$L_{p,r} = 10 \text{Log} \left( \frac{4}{R} \right) \quad [71]$$

sono, rispettivamente, i contributi del campo diretto e del campo riverberato al livello totale. Una rappresentazione grafica della precedente relazione è riportata nella Figura 74.

Osservando la figura si può dire che, per data sala e quindi per dato assorbimento delle pareti  $R$ , ad una distanza  $d$  dalla sorgente si può essere nella zona del campo diretto (ove  $L$  varia con  $d$ ) e pertanto per ridurre tale livello è opportuno coibentare la sorgente con l'uso di cuffie afoniche.

Se invece si è nella zona ad andamento costante, detta zona *riverberata*, occorre anche agire sull'ambiente per ridurre il livello sonoro, ad esempio coibentando le pareti o usando *banderuole* appese al soffitto in modo da ridurre i cammini riflessivi delle onde sonore.

Queste osservazioni sono importanti allorché si deve progettare un sistema di protezione dal rumore all'interno di uno stabilimento o di un cantiere al chiuso. La scelta delle operazioni da effettuare dipende dalla zona da proteggere.

Se si è in campo diretto occorre intervenire sulle macchine, altrimenti si deve intervenire accrescendo l'assorbimento della sala mediante l'applicazione di materiale fonoassorbente alle pareti (se possibile) o al soffitto.

Nella Figura 75 si ha il caso di una protezione in campo diretto mediante l'applicazione di una cuffia afonica alla macchina operatrice.

Nelle figure successive si hanno rappresentazioni tipiche di alcune cuffie afoniche per macchine operatrici in varie esecuzioni per consentire l'accesso alla macchina e/o l'introduzione dei materiali.

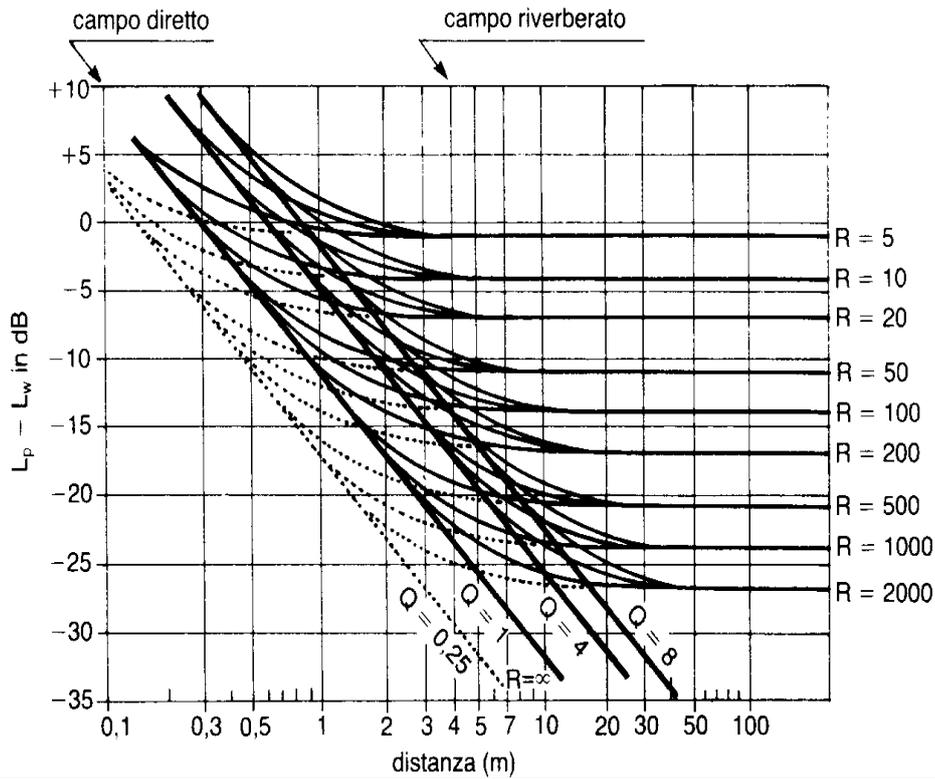


Figura 74: Andamento del livello interno in una sala per effetto del livello diretto e riverberato.

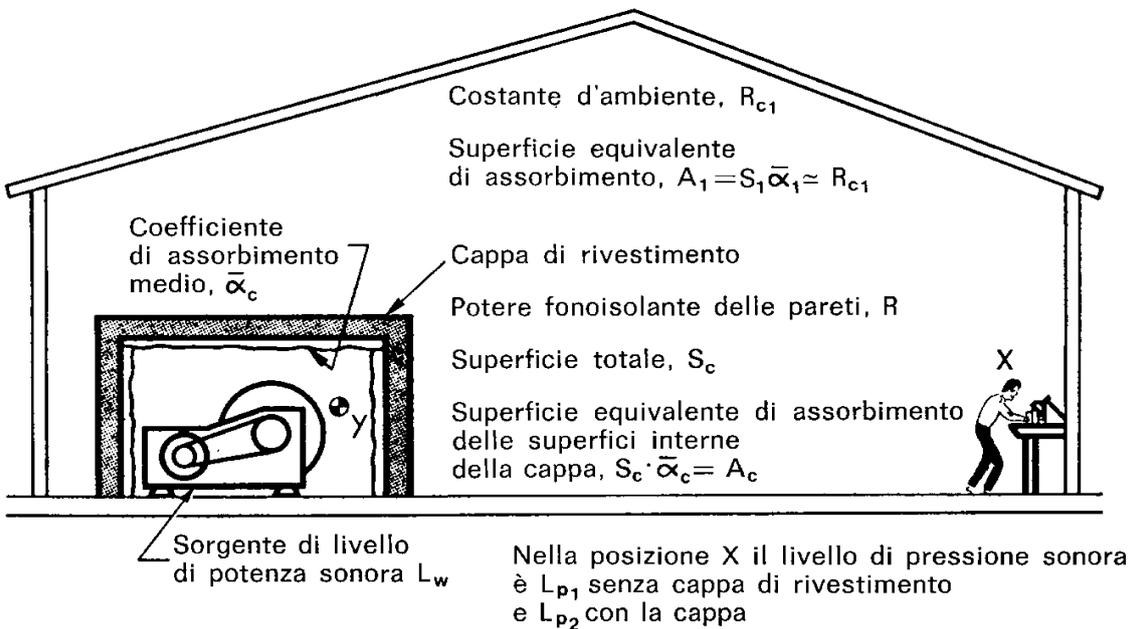


Figura 75: Esempio di applicazione di cuffia afonica

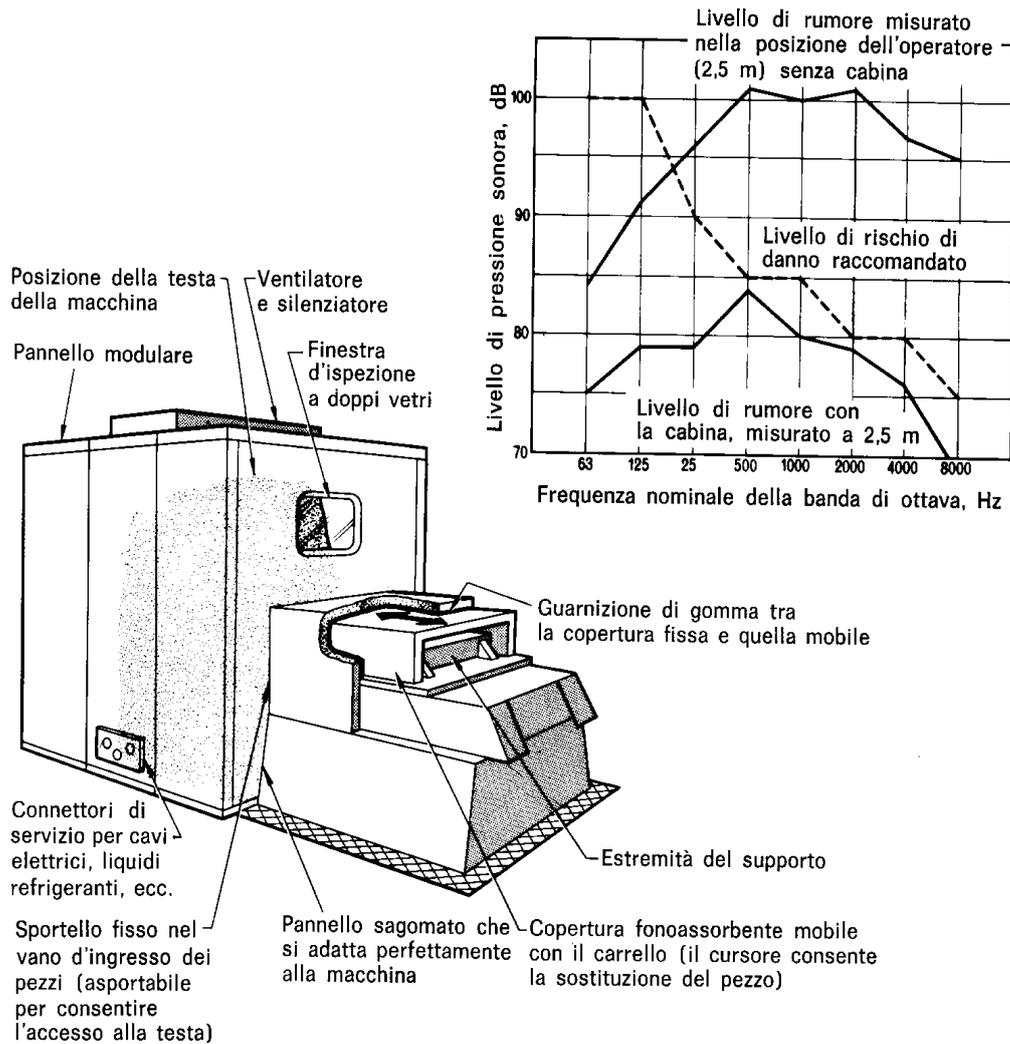


Figura 76 Tipologia di cuffia afonica per macchina operatrice

#### 4.5.1. ATTENUAZIONE DELLE VIBRAZIONI PER RIDURRE LA RUMOROSITA' AEREA

Spesso la miglior difesa dal rumore è la riduzione della trasmissione delle vibrazioni che le macchine o gli impianti generano per il loro funzionamento.

Queste vibrazioni vengono trasmesse elasticamente dalle strutture (di solito in cemento armato) che poi le reirradiano negli ambienti.

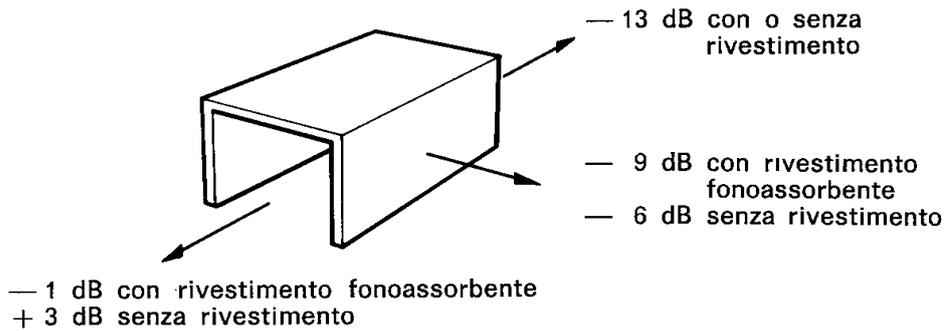
I suoni così generati sono detti *air born sound* e sono caratterizzati da una marcata indeterminazione nella provenienza. Nascono nell'aria, appunto, e quasi sempre sono di bassa frequenza.

Per ridurre le vibrazioni trasmesse si possono applicare agli appoggi opportuni isolatori elastici o a molla, come indicato in figura seguente.

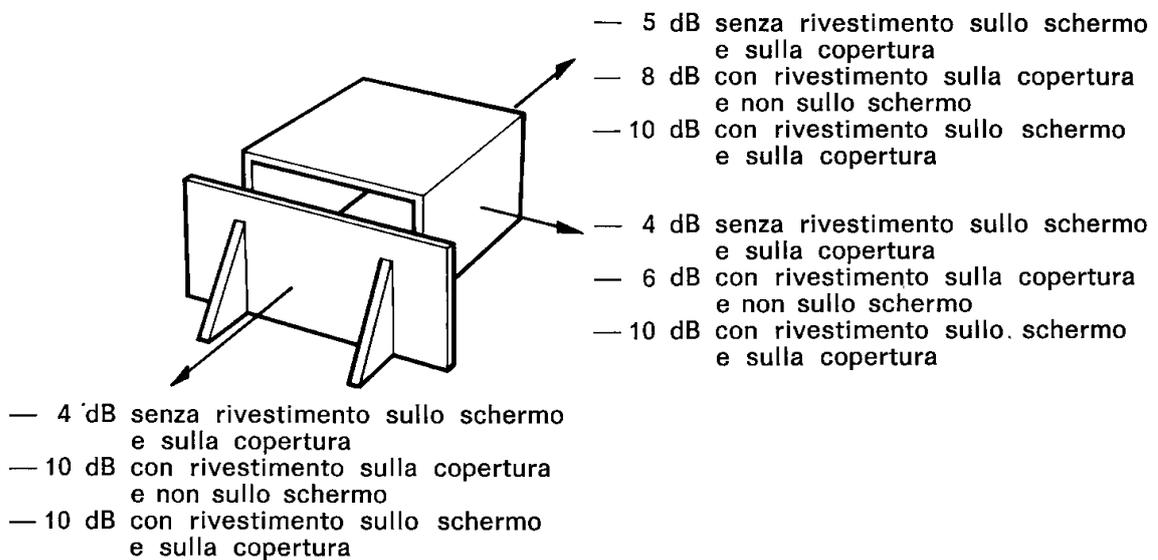
Per grossi e pesanti macchinari è sempre opportuno effettuare un progetto di basamento isolante in modo da evitare sia la trasmissione delle vibrazioni che l'insorgere di pericolosi danni alle strutture nel caso di vibrazioni di grande intensità. Una tecnica che può risultare utile nella pratica è quella del *pavimento galleggiante*.

Si tratta di un'esecuzione della posa in opera del pavimento tramite una membrana isolante ed elastica che assorbe e attenua le vibrazioni indotte dal calpestio.

## COPERTURA APERTA DA UN LATO



## COPERTURA APERTA DA UN LATO E CON SCHERMO MOBILE



## TUNNEL

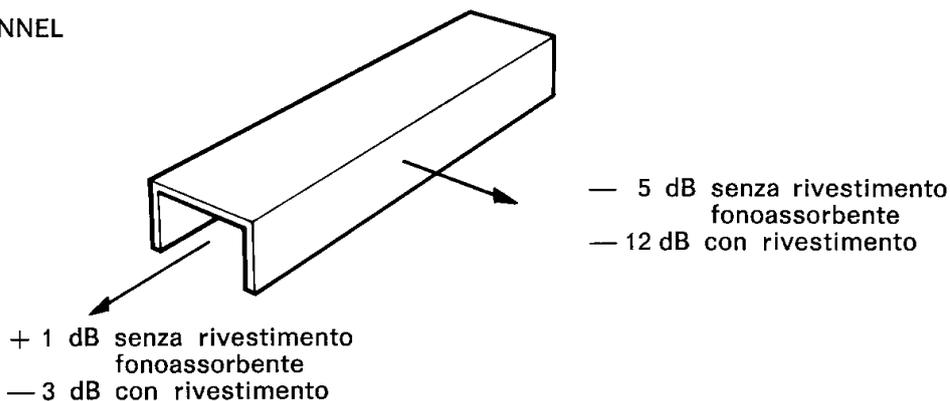
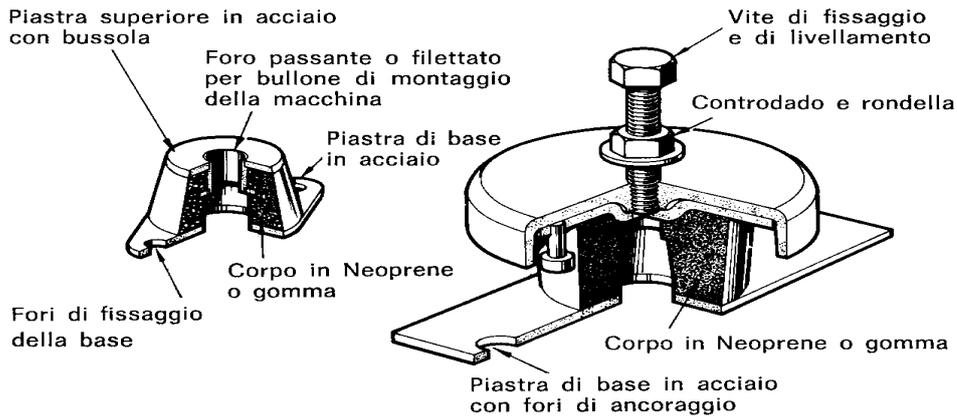
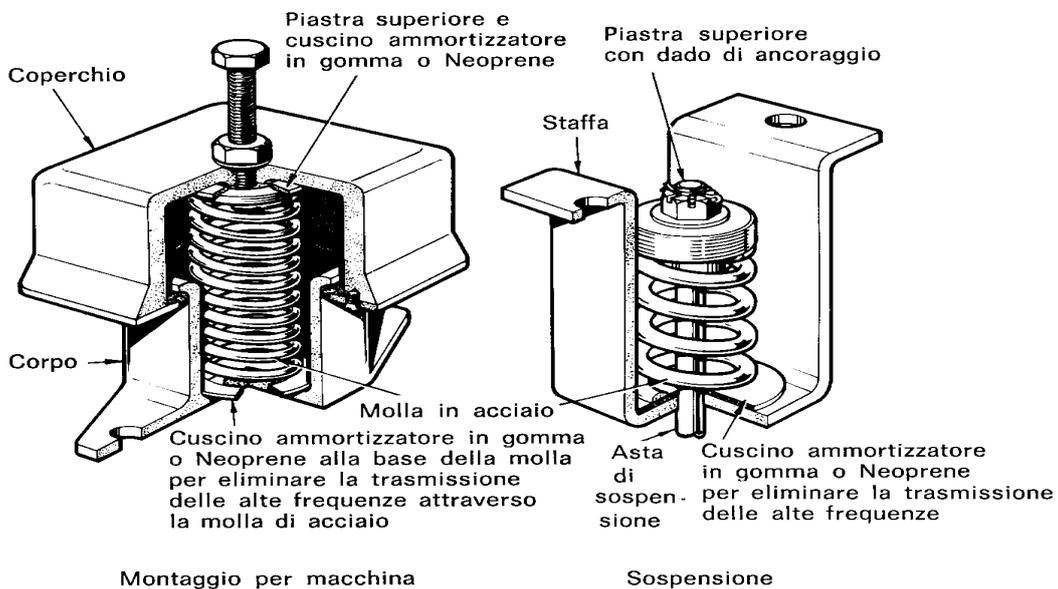


Figura 77: Cuffie afoniche per macchine con flussi di materiali entranti e/o uscenti



(a) Supporti in gomma o Neoprene lavoranti al taglio



(b) Molle di acciaio per una elevata deflessione

Figura 78: Esempi di isolatori per la riduzione delle vibrazioni

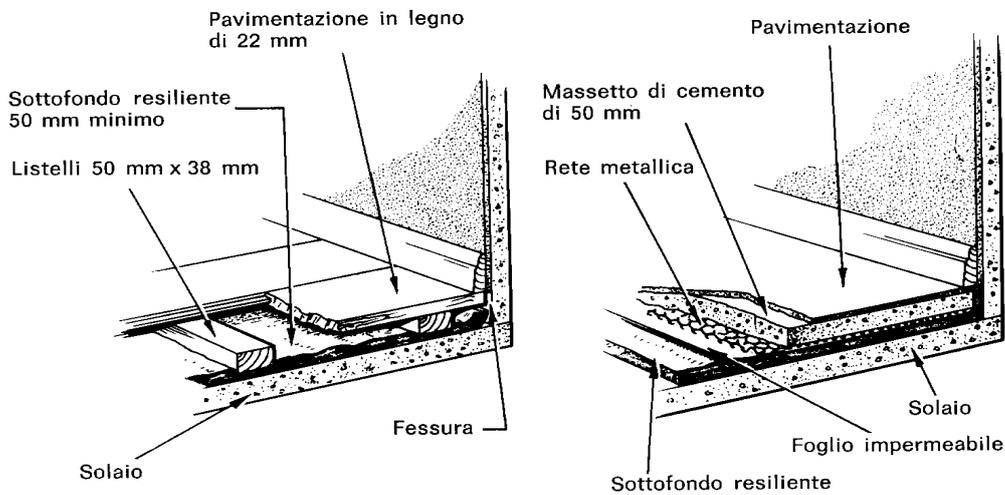


Figura 79: Esempio di pavimento galleggiante

## 4.6. ATTENUAZIONE DEI SUONI IN AMBIENTI APERTI

Il livello ponderato in un punto qualsiasi a distanza dalla sorgente è dato da

$$L_A = L_{A \text{ rif}} - (A_{\text{div}} - A_{\text{barrier}} - A_{\text{atm}} - A_{\text{excess}}) \quad (\text{dB}) \quad [72]$$

cioè un rumore emesso da una sorgente subisce delle attenuazioni del suo livello misurato a breve distanza dalla sorgente ( $L_{A \text{ rif}}$ ) dovute a molteplici fattori; succede così che un eventuale ricevitore lo percepisce più o meno attenuato a seconda di

- $A_{\text{div}}$  : fattori propri del modo di propagarsi delle onde sonore come la *divergenza*
- $A_{\text{barrier}}$  : fattori dovuti ad eventi occasionali come la presenza di *barriere* naturali o artificiali
- $A_{\text{atm}}$  : fattori atmosferici
- $A_{\text{excess}}$  : fattori localizzativi come il tipo di terreno e di vegetazione

Questa è la relazione fondamentale da applicare per il calcolo dei livelli di pressione sonora in una zona, interna o esterna, da analizzare, come ad esempio in un cantiere mobile, in una officina, ...

### 4.6.1. DIVERGENZA SONORA

Quando ci troviamo vicini ad una sorgente di rumore fastidiosa pensiamo quel rumore risulterà meno disturbante, ed effettivamente all'aumentare della distanza dalla fonte di suono, il livello di pressione sonora diminuisce sempre di più. Questo fatto è dovuto alla *divergenza geometrica* dell'onda sonora.

Come abbiamo avuto modo di vedere nel paragrafo dedicato all'intensità dei suoni, l'energia sonora si distribuisce su porzioni di superficie sempre più ampie mano a mano che il fronte d'onda si allontana dalla fonte di suono; nel caso in cui la sorgente sia puntiforme, il mezzo di propagazione uniforme e l'atmosfera esente da fenomeni di perturbazione come vento o gradienti di temperatura, i fronti d'onda sono sferici cosicché l'energia sonora si distribuisce su una superficie molto ampia; ecco che il livello di pressione misurato in una data direzione risulta attenuato, nel caso in esame, di *6 dB ad ogni raddoppio della distanza*.

Si potrebbe fare un parallelo con i fenomeni luminosi pensando alla luce di una lampada da tavolo. Se proviamo a togliere il riflettore alla lampadina, ci accorgeremo che la luce arriva con minore intensità sul piano di lavoro anche se una maggiore superficie della stanza viene illuminata; la luce si è quindi diffusa perdendo di intensità laddove veniva convogliata dal riflettore anche se l'energia totale irradiata è sempre costante.

Le sorgenti reali non sono puntiformi ma quando la distanza dell'ascoltatore è molto grande in rapporto alle dimensioni della sorgente di rumore, possono essere considerate tali. Nel caso molto frequente, in cui vicino alla sorgente ci siano delle superfici riflettenti, l'attenuazione per divergenza non sarà più di 6 dB ad ogni raddoppio della distanza, ma varierà a seconda della forma e della posizione delle superfici in rapporto quindi alla *direzionalità* della sorgente.

In questi casi l'energia viene convogliata in una direzione e il suo fronte d'onda risulta meno esteso; l'intensità, essendo una potenza specifica sarà, a parità di distanza, maggiore e di conseguenza anche il livello sonoro. Ecco che l'attenuazione in questo caso risulterà minore.

### 4.6.2. FATTORI ATMOSFERICI

Il suono subisce una perdita di energia anche a causa del suo mezzo di trasmissione più comune: l'aria. Attraverso una serie di processi molecolari l'energia viene ceduta sotto forma di

calore all'ossigeno con una attenuazione dell'intensità sonora che dipende dalla distanza, dalla frequenza, dall'umidità relativa e in parte dalla temperatura. L'attenuazione per una distanza  $d$  sarà:

$$A_{atm} = \alpha d/100 \text{ dB} \quad [73]$$

con  $\alpha$  coefficiente di attenuazione atmosferica.

Questo tipo di attenuazione può essere trascurata per distanze dell'ordine delle decine di metri e per frequenze basse. Diventa sensibile alle alte frequenze e quando il percorso dell'onda sonora è di centinaia di metri e oltre; in questi casi, poiché  $A_{atm}$  è di *circa 0.33 dB ogni 100 metri* alla frequenza di 500 Hz, si possono avere riduzioni di parecchi dB.

L'influenza sulla distribuzione in frequenza di questo fenomeno è evidente per i rumori molto distanti. La risposta in frequenza del rumore viene infatti modificata soprattutto nella parte alta dello spettro sonoro cosicché il suono arriva all'ascoltatore con una tonalità più grave di quella realmente emessa.

### 4.6.3. ATTENUAZIONI DOVUTE A FATTORI NATURALI

La vegetazione intesa come arbusti, siepi, erba produce il cosiddetto *effetto suolo*, una riduzione del rumore efficace solo per distanze superiori alla decina di metri e per sorgente ed ascoltatore posti a piccole altezze dal terreno. I valori di attenuazione dovuti a questo fenomeno possono essere di circa 5dB per frequenze comprese tra 500 e 1000 Hz a una distanza di 5 metri e 10dB a distanze oltre i 10 metri.

Non bisogna confondere tuttavia questo tipo di attenuazione con quella procurata dall'effetto barriera; in questo caso infatti l'effetto assorbente è dovuto alla porosità del terreno causata dalla presenza delle radici: succede allora che il terreno si comporta come un materiale fonoassorbente.

Esiste anche un effetto barriera dovuto alla vegetazione ma perché sia apprezzabile è necessario che le foglie degli alberi siano estremamente dense così da essere equiparate ad una barriera. Altrimenti l'effetto schermante si limita alle frequenze superiori ai 2Khz ossia quando la lunghezza d'onda del suono è paragonabile alla dimensione del fogliame. L'attenuazione per effetto barriera di vegetazione composta da piante basse è data da:

$$A_{excess} = (0.18 \log f - 0.31)r \text{ dB} \quad [74]$$

dove  $r$  è la distanza sorgente-ricevitore. Per piante alte ma con fogliame denso

$$A_{excess} = 0.01 f^{1/3} r \text{ dB} \quad [75]$$

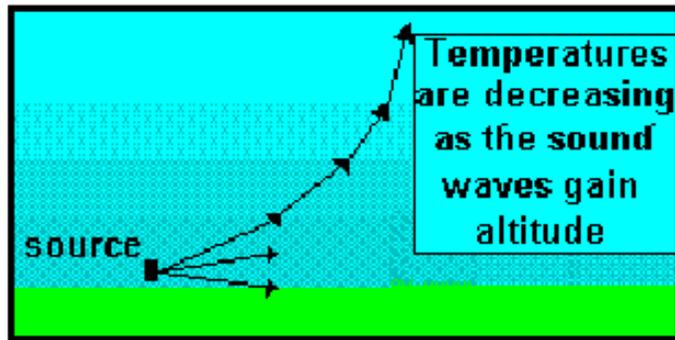
E' evidente che maggiori saranno la distanza e la frequenza maggiore sarà l'attenuazione. Anche i fattori climatici influenzano il suono. Tra questi vi sono le precipitazioni atmosferiche, la nebbia, il vento ed i gradienti di temperatura.

L'influenza dei primi due fattori non è uniformemente riconosciuta dai ricercatori anche se alcuni ritengono che una qualche attenuazione dei rumori sia dovuta alla nebbia alla pioggia e alla neve; è da dimostrare se ciò sia dovuto a una reale influenza di questi eventi sul rumore o se i cambiamenti nelle abitudini della gente, nei periodi in cui questi eventi si verificano, siano alla base della riduzione di rumore.

Come abbiamo già accennato, il vento e i gradienti di temperatura hanno invece una importanza dimostrata nella modificazione dei rumori.

La velocità del vento tende a crescere all'aumentare della quota in modo tale da ripiegare verso il suolo quella parte del fronte sonoro che altrimenti si sarebbe propagata verso l'alto.

Questo fenomeno tende a rafforzare il suono che noi percepiamo se la direzione in cui soffia il vento è uguale a quella di propagazione dell'onda sonora. Il fronte d'onda viene ripiegato anche dai gradienti di temperatura dell'atmosfera.



*Figura 80: Effetti del gradiente di temperatura*

Come sappiamo infatti, la velocità del suono è funzione diretta della temperatura dell'aria; in condizioni di temperatura costante il fronte sonoro si propaga con velocità uguale in tutte le direzioni; quando ci sono variazioni della temperatura atmosferica la velocità di propagazione si differenzia assumendo valori maggiori dove la temperatura è più alta e viceversa.

Questo fatto provoca un ripiegamento dell'onda verso le zone a minor temperatura con un conseguente aumento del livello proprio. Si spiegano così quei fenomeni per cui, quando la temperatura cresce con l'atmosfera (inversione termica), suoni di livello molto basso possono essere percepiti anche a grandi distanze.

## 5. EFFETTI DEL RUMORE SULL'UOMO

Utilizziamo spesso la parola rumore senza averne piena coscienza. Il rumore è certamente un suono non desiderato ma è pur sempre un suono. L'attributo di suono non desiderato riassume un giudizio dato dall'Uomo, pertanto un rumore è un suono affetto da un giudizio psicofisico dell'Uomo. Mentre il suono ha caratteristiche fisiche note e misurabili (pressione, velocità, livelli, ...) il giudizio dell'Uomo è prettamente soggettivo e non rilevabile se non con comparazioni statistiche su campioni di normotipi. In questo capitolo si vedranno gli effetti del rumore sull'Uomo. Questi non sono solamente limitati al disturbo ma anche a danni fisici che possono portare alla sordità (parziale e/o totale) dei soggetti interessati.

Il rumore<sup>7</sup> è uno degli agenti inquinanti più diffusi del nostro tempo. La vita dell'uomo nelle città e negli ambienti di lavoro è sottoposta continuamente a stimoli acustici che si accumulano uno dopo l'altro influenzando negativamente il benessere fisico e psichico dell'individuo.

Gli effetti nocivi del rumore non si ripercuotono esclusivamente sugli organi dell'udito ma anche, attraverso lo stress, sul sistema nervoso, cardiovascolare, digestivo ed endocrino.

---

<sup>7</sup> La definizione di rumore sarà data nel prosieguo a proposito della legislazione vigente in Italia. Qui basti osservare che un rumore è un suono capace di produrre disturbo o danno all'Uomo. Per la valutazione del disturbo occorre un giudizio e pertanto il rumore può essere considerato come la somma di un fenomeno fisico (il suono) e di uno psicofisico (il giudizio di accettabilità che ne dà l'Uomo).

Purtroppo gli effetti del rumore non sono immediatamente visibili, tranne nei casi estremi di lesioni agli organi uditivi, ma si sommano nel tempo.

Un individuo soggetto a rumorosità ambientale superiore a 80 dBA è soggetto a rischi uditivi oltre che ad una serie notevole di effetti e danni di natura neurovegetativa.

## 5.1. PARAMETRI DA CUI DIPENDE IL RUMORE

I parametri fisici da cui dipende il rumore possono essere riassunti nel tripode del rumore (come indicato dal prof. M. Cosa):

- **La pressione sonora (dB)**
- **La durata del suono (s)**
- **La composizione spettrale (Hz)**

Queste grandezze sono tutte rivelabili strumentalmente e quindi misurabili. Più complessa è la valutazione delle componenti soggettive psicofisiche ed accessorie del rumore, quali:

- **La saturazione**
- **L'identificabilità della sorgente**
- **Il controllo dell'emissione**
- **L'effetto sorpresa**
- **La sensibilità sensoriale**
- **La presenza di un contenuto semantico**

Queste componenti non sono misurabili strumentalmente ma attraverso un giudizio soggettivo delle persone che subiscono l'effetto del rumore. Pertanto risulta estremamente complesso caratterizzare un rumore con un unico indicatore oggettivo.

Negli ultimi due decenni si è cercato di caratterizzare il rumore con indici di valutazione connessi a particolari attività o funzioni dei soggetti interessati (vedi, ad esempio, indici NR e NC) oppure sono stati proposti descrittori complessi quali il LNP o altri più specifici per situazioni più particolari (ad esempio il TNI per il rumore da traffico veicolare).

## 5.2. EFFETTI DEL RUMORE SUL CORPO UMANO

Gli effetti del rumore sull'uomo possono essere di varia natura, come riportato nella seguente tabella. Gli effetti sono catalogati come:

- **Danno**: se provocano alterazioni psico-fisiche permanenti;
- **Disturbo**: setali effetti provocano alterazioni psico-fisiche temporanee;
- **Annoyance**: quando gli effetti provocano sensazioni di disagio o di fastidio che pone il soggetto ascoltatore in una posizione di giudizio negativo.

Nella seguente Tabella 13 si riporta un quadro sinottico dei danni che il rumore può provocare nei vari apparati dell'Uomo.

<i>Apparato</i>	<i>Sintomi</i>	<i>Evoluzione</i>	<i>Soglia in dB(A)</i>
Uditivo	– Fischi e ronzii persistenti	Sordità	> 80
Cardio-vascolare	– Accelerazione ritmo cardiaco – Aumento pressione arteriosa	Arterio sclerosi	> 75
Cerebrale	– Disadattamento	Turbe psichiche	> 95
Digerente	– Disturbi digestivi – Bruciori di stomaco	Gastrite Ulcera	< 95
Dell'equilibrio	– Vertigine e nausea	Perdita dell'equilibrio	> 110
Respiratorio	– Tachipnea – Diminuzione volume corrente		95
Visivo			> 75

Tabella 13: Danni provocati dal rumore nei vari apparati

### 5.3. EFFETTI DEL RUMORE SULL'UDITO

Il legame esistente tra esposizione al rumore e lesione al sistema uditivo è conosciuto e studiato da circa duecento anni.

Un'esposizione prolungata al rumore può provocare una perdita uditiva temporanea, cioè reversibile al termine dell'esposizione, oppure una perdita uditiva permanente cioè irreversibile. Le parti dell'orecchio in cui inizialmente si localizzano le lesioni sono l'orecchio esterno e medio.

La rottura del timpano, dovuta all'alta pressione di un suono violento, è una patologia che rientra in questo caso; tuttavia seppur dolorosa non è un danno gravissimo ed è in parte rimediabile per via chirurgica. Infatti le lesioni provocate all'orecchio interno sia da suoni violenti che da una esposizione al rumore prolungata nel tempo sono assai più pericolose e difficilmente rimediabili.

Un danno specifico da rumore è l'*ipoacusia* che consiste nell'innalzamento della pressione di soglia percepibile, così da rendere l'individuo sordo a suoni di particolari frequenze. Il punto in cui avvengono le lesioni è, per esposizioni sia ad alte che a basse pressioni, il giro basale della chiocciola ed in particolare, la regione nella quale vengono recepite le frequenze attorno ai 4000 Hz (effetto *Bruehl*).

Una esposizione prolungata al rumore eccessivo anche se non violento, può portare alla sordità pressoché totale passando attraverso perdite graduali e variabili della sensibilità alle frequenze e all'intensità; ciò dipende sia dalla predisposizione fisica dell'individuo, sia dallo spettro sonoro del rumore a cui esso è sottoposto; gli ultrasuoni ad esempio sono più dannosi delle altre frequenze. Da statistiche mediche è risultato che, mediamente, una persona, dopo dieci anni di esposizione a rumore eccessivo (vedi ambienti lavorativi), subisce, per le frequenze attorno ai 4000 Hz, una perdita di sensibilità superiore ai 40 dB.

Il rumore produce sull'apparato uditivo danni che possiamo catalogare in temporanei e permanenti. In entrambi i casi questi possono essere facilmente rilevati mediante esami audiometrici.

Le manifestazioni misurabili della perdita della capacità uditiva possono così classificarsi:

- *stato di adattamento;*
- *fatica uditiva;*
- *trauma acustico;*
- *sordità professionale.*

Il rumore intenso può provocare:

- *stordimento,*
- *difficoltà della parola,*
- *riduzione della memoria,*
- *sensazione di fatica,*
- *cefalea, spossatezza,*
- *irritabilità e inquietudine.*

Si osservi che di tutti i danni sopra citati solo quello relativo alla sordità è oggettivamente dimostrabile con certezza mediante un esame audiometrico, osservando l'innalzamento della soglia uditiva. Tutti gli altri danni hanno molto di soggettivo e non sono suscettibili di misura e quindi di certificazione medica. Questo è il motivo per cui si valuta il rischio uditivo solamente sulla possibilità di perdita dell'udito.

## 5.4. EFFETTI DEL RUMORE SUL SONNO

Il rumore interferisce notevolmente con il sonno inibendo, se ad alti livelli, la fase di transizione al sonno profondo. Nella Tabella 14 si ha la scala di lesività del rumore proposta da Cosa-Nicoli.

> = 55	Possibili disturbi del sonno a finestre aperte
> = 60	Possibili disturbi del sonno e della conversazione a finestre aperte
> = 65	Possibili disturbi del sonno e della conversazione anche a finestre chiuse
> = 55	Disturbi del sonno e della conversazione; possibili reazioni

Tabella 14: Tabella di Cosa – Nicoli sulla lesività del rumore

## 5.5. DESCRITTORI ACUSTICI PER IL RUMORE

Oltre al livello di pressione sonora (LPS) riveste grande importanza il **Livello equivalente ponderato in scala A**, assunto ormai quale descrittore acustico fondamentale per la valutazione del rumore ai sensi del DPCM 1/3/91. Esso è definito dalla seguente relazione:

$$L_{Aeq,t} = 10 \text{Log} \left[ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2(t)} dt \right] \quad \text{in dB(A)} \quad [76]$$

ove:

- $L_{Aeq,t}$  è il livello continuo equivalente ponderato nella scala A
- $t_1$  istante iniziale della misura
- $t_2$  istante finale della misura
- $T = t_2 - t_1$  periodo totale di misura

- $p_A(t)$  pressione sonora ponderata in scala A.

Lo strumento che può calcolare automaticamente questo descrittore si chiama **Fonometro Integratore** ed è espressamente indicato dal D.P.C.M. 1/3/91 quale unico strumento da usare per tale misure.

Si osservi che questo *descrittore* non rispetta tutti i parametri fisici e psicofisici relativi alla valutazione del rumore ma solo alcuni parametri fisici (tempo e pressione).

La limitatezza di questo descrittore è compensata dalla facilità di misura (solo strumentale mediante il fonometro integratore) mentre la valutazione dei parametri psicofisici richiederebbe indagini sociologiche complesse e spesso imprecise. Il **Livello di Esposizione Sonoro**,  $L_{AE}$ , è un livello di energia mediato nell'intervallo di un secondo, qualunque sia la durata della misura. In altre parole, con riferimento alla formula del  $L_{eq}$  ove l'intervallo di integrazione è pari a  $T=t_2-t_1$ , si hanno, riferendo la misura ad 1 secondo, le relazioni seguenti.

$$L_{AE} = L_{eq} + 10 \log T \quad [77]$$

Spesso occorre studiare particolari eventi che hanno origine al di sopra di una certa soglia di livello sonoro. Il Livello Equivalente di questi particolari eventi viene indicato con SEL (*Short Equivalent Level*). Nella Figura 81 si ha la rappresentazione dell'evento da analizzare (in verde) e per esso si calcola il SEL.

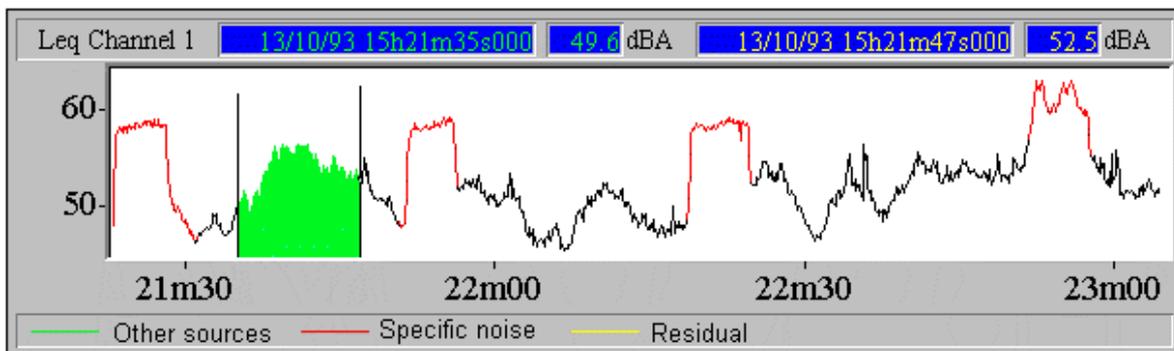


Figura 81: Short Equivalent Level

## 5.6. EFFETTI DELL'ESPOSIZIONE AL RUMORE NEGLI AMBIENTI LAVORATIVI.

Poiché le onde sonore trasportano energia il loro assorbimento causa nell'organismo umano (e in special modo nell'apparato uditivo) affaticamento. Si definisce **dose di rumore** la *quantità di energia totale assorbita in un periodo di esposizione*.

Normalmente il periodo di esposizione tollerabile è correlato con il recupero fisiologico. Un'esposizione ad un rumore di elevata intensità per un certo periodo di tempo comporta l'innalzamento della soglia uditiva.

In Figura 82 si ha un'indicazione delle relazioni fra perdita temporanea dell'udito e numero di ore di esposizione a data intensità.

Nella Figura 83 si ha l'andamento dello spostamento temporaneo della soglia uditiva in funzione delle ore di esposizione ad un rumore di intensità pari a 80, 85 e 90 dBA. Tale spostamento viene rilevato effettuando una misura audiometrica del lavoratore alla fine del turno lavorativo, entro i primi cinque minuti successivi.

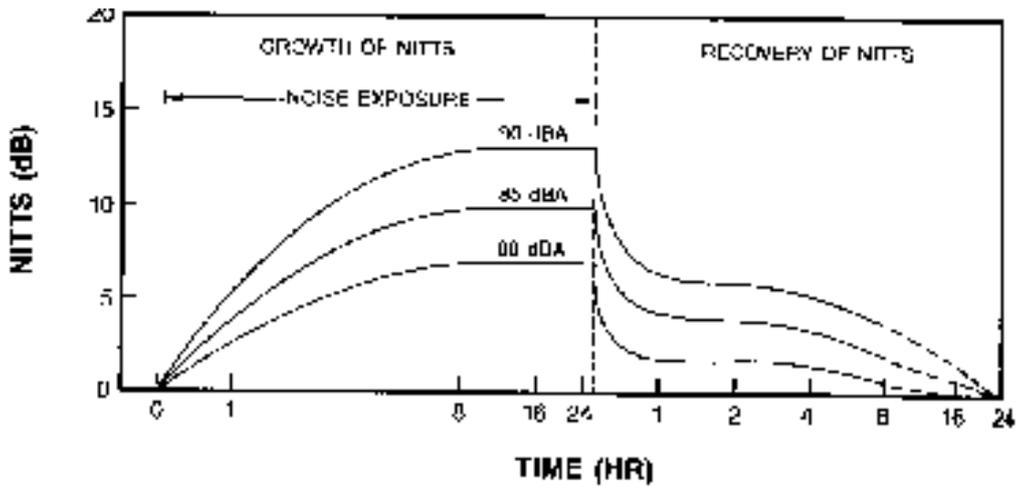


Figura 82: Andamento del NITTS in funzione del tempo di esposizione al rumore e suo recupero.

Come si può ben osservare dopo otto ore di riposo per un'esposizione ad un livello di 80 dBA si ha un recupero quasi totale del NITTS. La stessa cosa non può dirsi per un'esposizione ad un livello di 85 e 90 dBA. Per quest'ultimo caso si ha una perdita residua pari a 5 dBA.

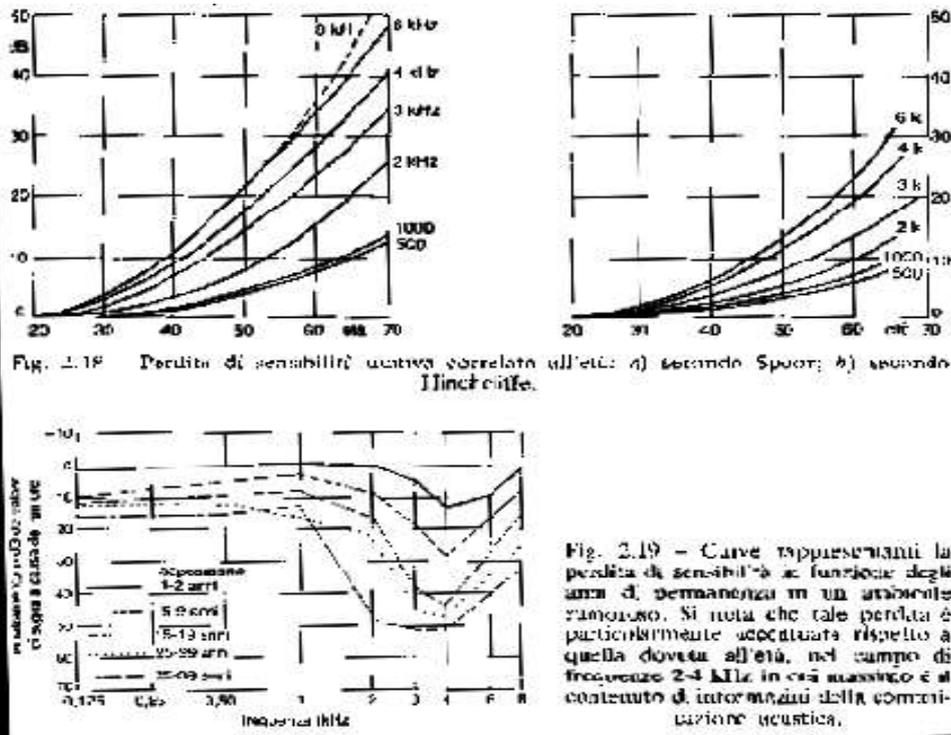


Fig. 2.18 Perdita di sensibilità uditiva correlata all'età: a) secondo Spoor; b) secondo Minchella.

Fig. 2.19 - Curve rappresentanti la perdita di sensibilità in funzione degli anni di permanenza in un ambiente rumoroso. Si nota che tale perdita è particolarmente accentuata rispetto a quella dovuta all'età, nel campo di frequenza 2-4 kHz in cui massimo è il contenuto di informazioni della comunicazione acustica.

Figura 83: Perdita dell'udito per lavoratori con anzianità lavorativa compresa fra 1 e 39 anni esposti a 80 dB.A

Per livelli superiori si avrebbero perdite residue ancora superiori e questo spiega l'attenzione a questi limiti posta dal D.Lgs 277/91 per la protezione dei lavoratori nei luoghi di lavoro.

Il NIOSH ha determinato la probabilità (*minima, media e massima*) di handicap uditivo (cioè la probabilità di avere un incremento di 25 dB della soglia uditiva) per esposizioni giornaliere variabili per un periodo di 40 anni. Questa curva è riportata in Figura 84.

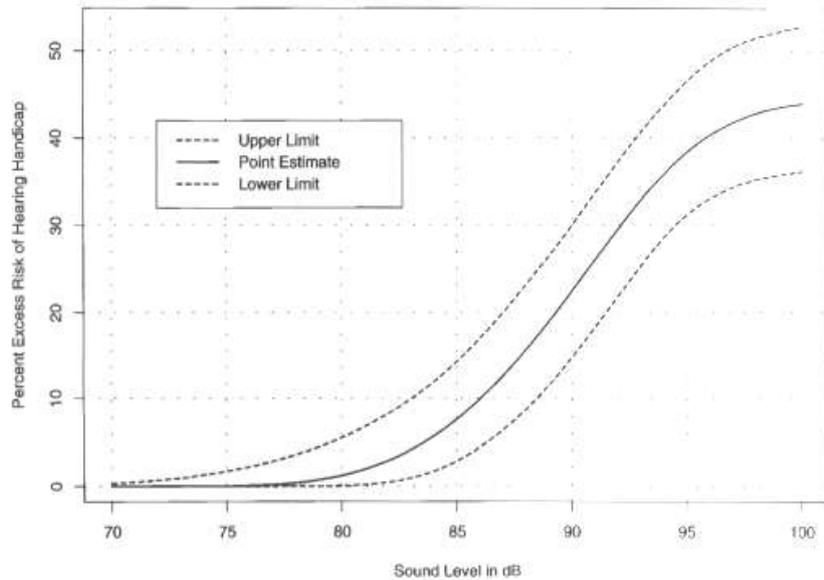


Figura 84: Probabilità di handicap uditivo data dal NIOSH

Come si può osservare fino a 80 dB la probabilità è quasi nulla e pertanto rientra nella variabilità statistica. Oltre questo valore la probabilità cresce: a 90 dB la probabilità media è circa il 22% che diviene 40% a 95 e 43% a 100 dB. Vedremo, nel prosieguo (applicazione del D. Lgs 277/91) come i limiti considerati di soglia e massimi tollerabili siano proprio di 80 dB e 90 dB. Le giustificazioni di queste scelte scaturiscono proprio da quanto sin qui osservato. A titolo esemplificativo si consideri l'audiogramma di Figura 85 che evidenzia nell'orecchio sinistro un danno dovuto all'effetto Brueel nelle frequenze di circa 4000 Hz.

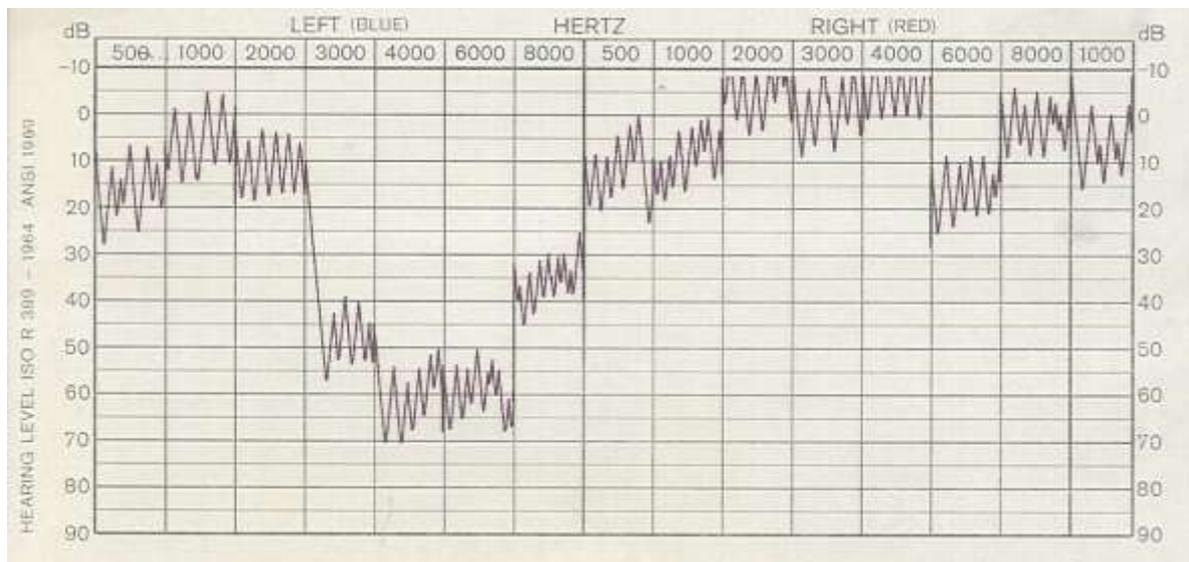
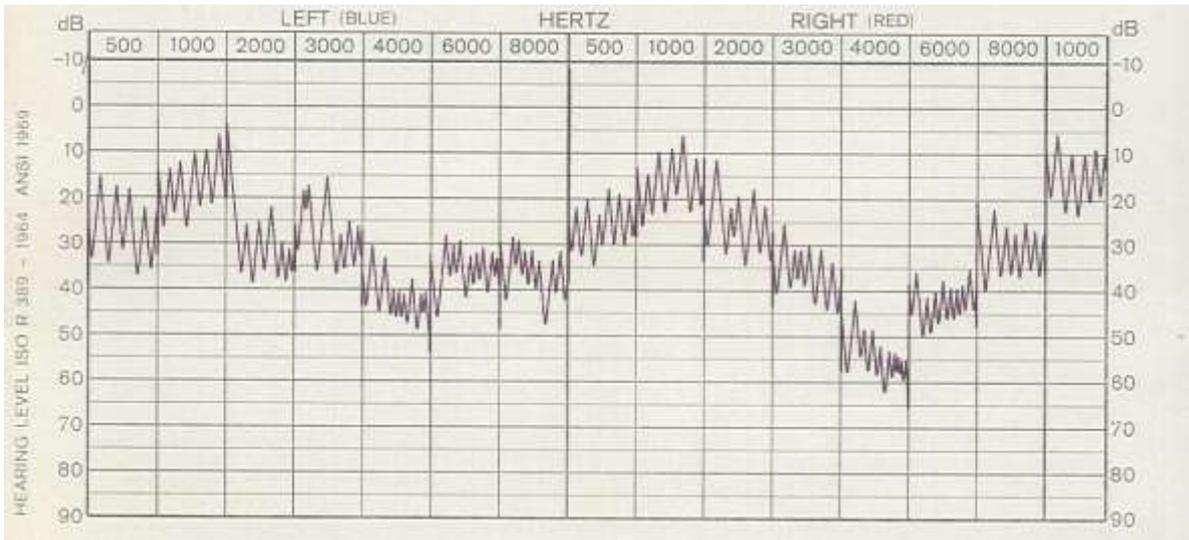


Figura 85: Audiogramma con danno di Brueel

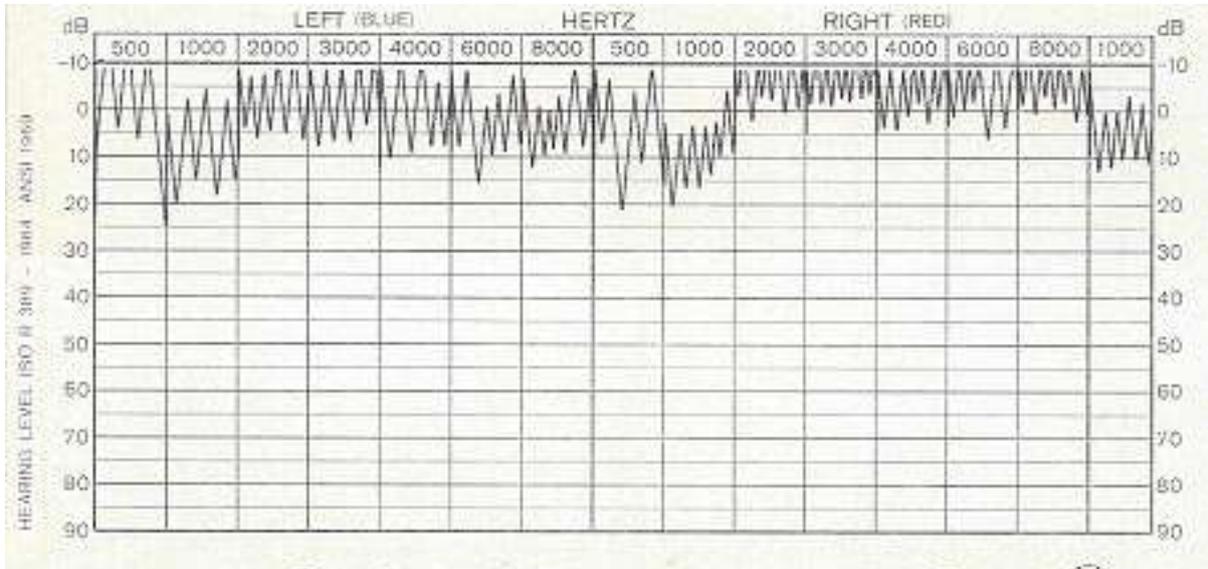
Questo audiogramma si riferisce ad un soggetto che ha svolto il servizio militare in artiglieria.

Nella Figura 94 si ha un audiogramma di una hostess con venti anni di servizio. Si osservi l'innalzamento della soglia uditiva di oltre 30 dB e il danno più marcato nell'orecchio destro.

In Figura 87 si ha un audiogramma di un soggetto sano. Si osservi come la soglia uditiva sia al livello zero per entrambi gli orecchi.



*Figura 86: Innalzamento della soglia uditiva per una hostess con 20 anni di servizio*



*Figura 87: Soglia uditiva di un soggetto normale*

## 6. IL D.P.C.M. 1-3-91

L'Italia ha sempre avuto disinteresse sulle norme relative al benessere dell'Uomo in ogni settore. Quasi sempre le norme su quest'argomento provengono da Enti internazionali e vengono importate quasi solamente per dovere istituzionale. Per il rumore e le norme ad esso relative si è avuto un primo decreto solamente il 1/3/91, dopo 130 anni dall'Unità d'Italia. Prima di questo decreto l'applicazione della Giustizia per immissione rumorose era dettata da un vecchio regolamento di polizia applicato in modo spesso soggettivo, senza alcuna garanzia di verifica oggettiva. Dopo il marzo 1991 si sono avute molte leggi e decreti in campo acustico, forse troppe.

### 6.1. IL D.P.C.M. 01/03/1991

E' questo il primo strumento legislativo organico emesso dopo 130 anni dall'Unità d'Italia.

Esso raccoglie in modo organico alcune disposizioni per la valutazione e controllo della rumorosità immessa nelle abitazioni e nell'ambiente esterno.

Malgrado l'attesa di tutta la comunità per questo decreto, non si può dire che esso sia stato applicato interamente su tutto il territorio nazionale. Una sentenza della Corte Costituzionale ne ha bloccato l'efficacia nella parte più di competenza dei comuni: in particolare non è stato possibile zonizzare le aree comunali e pertanto fissare limiti di rumorosità esterna compatibili con le aree urbane. Pur con queste limitazioni questo decreto ha messo ordine nel mondo giudiziario fornendo criteri oggettivi di valutazione del rumore nei contenziosi civili.

Esso ha inoltre standardizzato le metodologie di misura ed ha indicato nel livello continuo equivalente (Leq.A) l'unico parametro fisico di riferimento per le valutazioni della rumorosità interna ed esterna.

Il decreto detta nell'Allegato A le definizioni tecniche e nell'Allegato B le tecniche di rilevamento e di misura dell'inquinamento acustico. Sono escluse dal decreto le sorgenti di rumore interne a stabilimenti industriali ed artigianali che non diffondono rumore nell'ambiente esterno.

## 6.2. ATTIVITÀ ESCLUSE DAL DECRETO

Oltre alle sorgenti di rumore interne a stabilimenti industriali ed artigianali che non diffondono rumore nell'ambiente esterno, sono escluse dal decreto:

- le aree e le attività aeroportuali che dovranno essere regolamentate da altro decreto (ancora non emesso);
- le attività temporanee (quali cantieri edili, manifestazioni in luogo pubblico) che comportino l'uso di macchinari ed impianti rumorosi: esse debbono essere autorizzate dal Sindaco anche in deroga allo stesso D.P.C.M. 1-3-91. Per i cantieri temporanei è stata emessa la L. 494/96 che ne disciplina la sicurezza anche nei confronti delle sorgenti rumorose, in conformità al D.Lgs 277/91.

Questo decreto riveste importanza anche per la sicurezza nei cantieri lavorativi (L. 494/96 e successive modificazioni) quando il rumore prodotto dai macchinari interessa le abitazioni vicine.

## 6.3. LA ZONIZZAZIONE ACUSTICA

L'art. 2 del D.P.C.M. 1-3-91 stabilisce che i comuni adottano la classificazione in zone riportate nella tabella I. Questa classificazione è valida solo quando non si ha la zonizzazione del territorio indicata dallo stesso DPCM 1-3-91 poi sospesa dalla Corte Costituzionale e infine ripresa dalla L. 447/95.

Zonizzazione	Limite diurno	Limite notturno
Tutto il territorio nazionale	70	60
Zona A (D.M. 1444/68)	65	55
Zona B (D.M. 1444/8)	60	50
Zona esclusivamente industriale	70	70

Lo stesso articolo fissa i limiti massimi dei livelli sonori equivalenti in relazione alla diversa destinazione d'uso del territorio nella tabella successiva. Valori dei limiti massimi del livello sonoro equivalente (Leq.A) relativi alle classi di destinazione d'uso del territorio di riferimento

Classi di destinazione d'uso del territori	Tempi di riferimento	
	Diurno	Notturmo
I) Aree particolarmente protette	50	40
II) Aree prevalentemente residenziali	55	45
III) Aree di tipo misto	60	50
IV) Aree di intensa attività umana	65	55
V) Aree prevalentemente industriali	70	60
VI) Aree esclusivamente industriali	70	70

## 6.4. DEFINIZIONI FONDAMENTALI (ALLEGATO A)

Il DPCM 1-3-91 fornisce alcune definizioni tecnico-legali molto importanti anche ai fini dell'applicazione dello stesso decreto sia in sede tecnica che giudiziaria.

- **Rumore:** qualunque emissione sonora che provochi sull'uomo effetti indesiderati, disturbanti o dannosi o che determini qualsiasi deterioramento qualitativo dell'ambiente. Questa definizione lascia aperta la possibilità di interpretazioni giudiziarie non sempre oggettive poiché non sempre è facile definire quando e quanto un effetto sia *indesiderato* o anche semplicemente *disturbante*. Inoltre poiché il rumore produce un deterioramento qualitativo dell'ambiente quasi sempre i disturbi e i danni prodotti dal rumore sono anche penalmente perseguibili perché in contrasto con la Costituzione che garantisce la salubrità dell'ambiente a difesa dei cittadini.
- **Sorgente sonora:** qualsiasi oggetto, dispositivo, macchina o impianto o essere vivente idoneo a produrre emissioni sonore.
- **Sorgente specifica:** sorgente sonora selettivamente identificabile che costituisce la causa del disturbo. E' su questa sorgente che deve essere valutato il livello differenziale avanti definito.
- **Livello residuo (Lr):** è il livello continuo equivalente di pressione sonora ponderato "A" che si rileva quando si escludono le specifiche *sorgenti disturbanti*. Esso deve essere misurato con le identiche modalità impiegate per la misura del rumore ambientale. E' importante individuare le sorgenti disturbanti, definite nel prosieguo.
- **Livello ambientale (La):** è il livello continuo equivalente di pressione sonora ponderato "A" prodotto da tutte le sorgenti di rumore esistenti in un dato luogo e durante un determinato tempo. Il rumore ambientale è costituito dall'insieme del rumore residuo (come definito al punto precedente) e da quello prodotto dalle specifiche sorgenti disturbanti.
- **Livello differenziale:** differenza tra il livello  $Leq(A)$  di rumore ambientale e quello del rumore residuo.
- **Rumore con componenti impulsive:** emissione sonora nella quale siano chiaramente udibili e strumentalmente rilevanti eventi sonori di durata inferiore ad un secondo. Queste componenti sono penalizzate, come si vedrà più avanti, con l'aggiunta di 3 dBA al valore misurato dell' $Leq$ .
- **Rumore con componenti tonali:** emissioni sonore all'interno delle quali siano evidenziabili suoni corrispondenti ad un tono puro o contenuti entro 1/3 di ottava e che siano chiaramente udibili e strumentalmente rilevanti. Anche queste componenti sono penalizzate, come si vedrà più avanti, con l'aggiunta di 3 dBA al valore misurato dell' $Leq$ .

## 6.5. IL CRITERIO DIFFERENZIALE

Il D.P.C.M. 1-3-91 stabilisce all'art. 3 che *per le zone non esclusivamente industriali* indicate in precedenza, al limite massimo assoluto per il rumore, sono stabilite anche le seguenti differenze da non superare tra il livello equivalente del rumore ambientale e quello del rumore residuo (orientale differenziale): **5 dB (A)** durante il periodo diurno e **3 dB(A)** durante il periodo notturno.

La misura deve essere effettuata all'interno degli ambienti abitativi e nel tempo di osservazione del fenomeno acustico. In pratica si accetta un raddoppio del livello di pressione sonora, durante il periodo diurno, per effetto del rumore prodotto dalla sorgente specifica.

L'Art. 3.2 dell'allegato B fornisce ulteriori indicazioni sull'applicabilità del criterio differenziale. In particolare esso non si applica se il livello ambientale diurno è **< 40 dB(A)** e quello notturno è **< 30 dB(A)**. Inoltre se i valori di rumore ambientale supera **60 dB(A)** di giorno e **45**

**dB(A)** di notte non devono essere considerati accettabili ai fini dell'applicabilità del criterio del limite massimo differenziale, restando comunque valida l'applicabilità del criterio stesso per livelli di rumore ambientale inferiori ai valori sopraddetti.

Le motivazioni per la scelta di questo criterio sono riconducibili alla giurisprudenza corrente soprattutto di carattere regionale (Regione Lombardia, Regione Emilia Romagna, Regione Piemonte, ...) che aveva, fino al momento di emissione del decreto 1-3-91, sentenziato imponendo che il rumore indotto non dovesse produrre più del doppio del rumore di fondo.

In realtà l'applicazione di questo criterio richiederebbe che il rumore di fondo non sia esso stesso disturbante e che quindi il sovrappiù (*differenziale*) sia imputabile solo al disturbo della sorgente di rumore.

Un'altra motivazione del limite di 5 dB(A) è data dalla soglia di reazione comunitaria fissata dalla *Raccomandazione ISO R 1996*.

## 6.6. STRUMENTAZIONE E MODALITÀ DI MISURA

Strumentazione: debbono essere utilizzati strumenti in classe 1, come definiti negli *standard I.E.C. n. 651/1979 e 804/1985*. Le misure debbono essere eseguite con misuratore di livello sonoro (fonometro) integratore o strumentazione equivalente.

Ciò nasce dalla necessità di dovere calcolare il livello equivalente dato dalla relazione:

$$L_{eq,AT} = 10 \text{Log} \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2_A(t) dt}{p_0^2}$$

Nella figura seguente si ha una rappresentazione del LPS e del Leq per un rumore urbano.

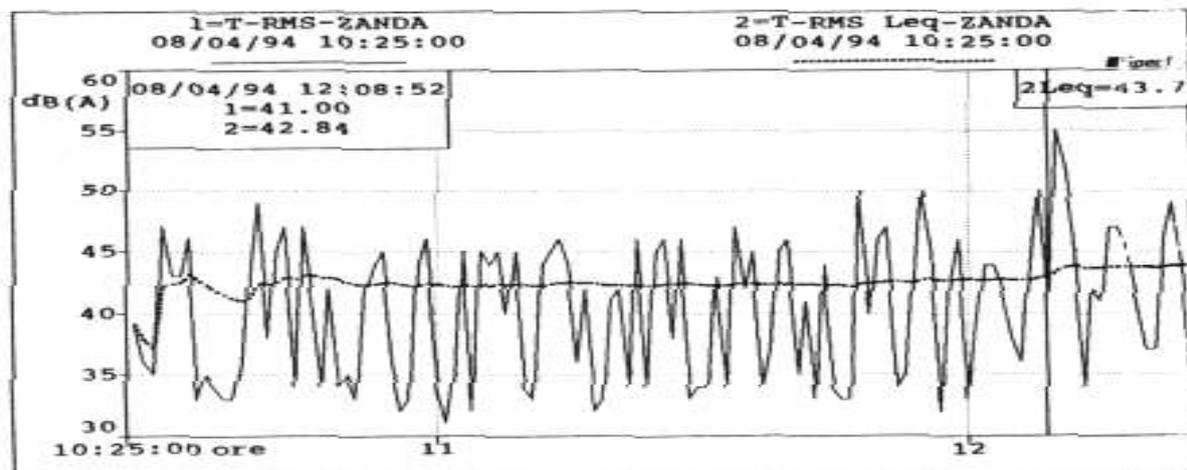


Figura 88: Andamento del LPS e del Leq.

### 6.6.1. RICONOSCIMENTO DI COMPONENTI IMPULSIVE NEL RUMORE

Per questa determinazione il D.P.C.M. 1-3-91 suggerisce all'art. 4 dell'All. B una semplice procedura. Si effettua la misura del livello massimo del rumore rispettivamente con costante di tempo **slow** ed **impulse**.

Qualora la differenza dei valori massimi delle due misure suddette sia superiore a 5 dB(A) viene riconosciuta la presenza di componenti impulsive penalizzabili nel rumore. In tal caso il valore del rumore misurato in Leq(A) dev'essere maggiorato di 3 dB(A).

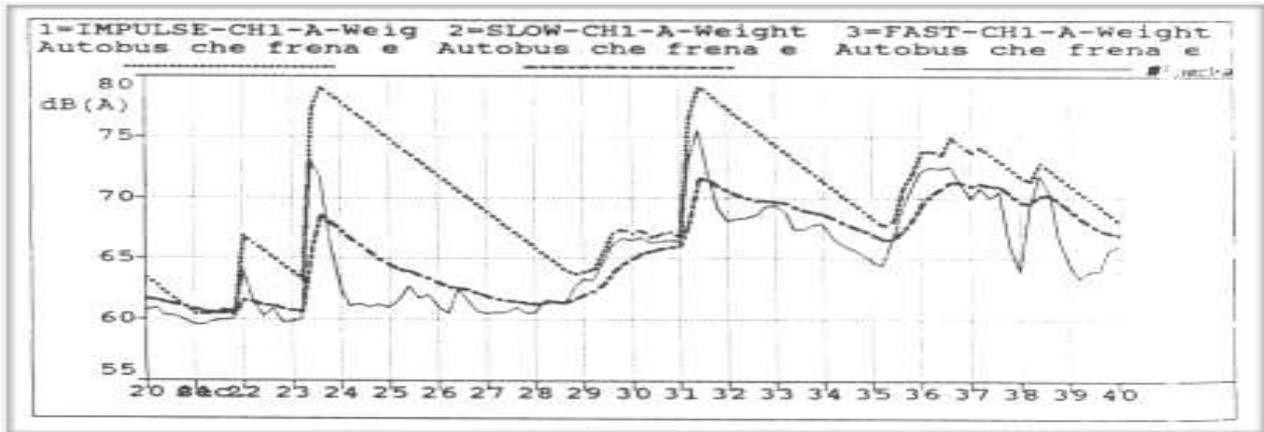


Figura 89: Rilevamento delle componenti impulsive secondo il DPCM 1-3-91

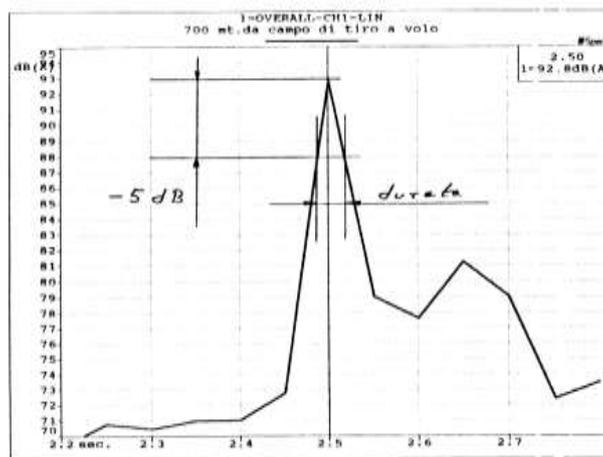


Figura 90: Criterio dell'abbassamento di  $-5$  dB al valore di picco.

Un rumore avente durata inferiore ad un secondo e di intensità superiore a 60 dBA si definisce impulsivo e risulta particolarmente fastidioso perché la durata ( $<1$  s) risulta inferiore del tempo medio di intervento dei muscoli tensore del timpano e dello stapedio. Pertanto la sensazione sonora risulta maggiore a causa del mancato intervento muscolare. Il DPCM 1-3-91 richiede che la presenza impulsiva sia rilevata mediante la contemporanea misura dell'evento sonoro e dall'essere il valore misurato con costante *impulse* superiore di almeno 5 dB a quella costante *slow*. Oltre a questo metodo si può controllare che la durata bilaterale del segnale a  $-5.0$  dB da  $LA_{max}$  *Fast* sia minore di 1 secondo, come indicato nella figura 3.

### 6.6.2. RICONOSCIMENTO DEI COMPONENTI TONALI NEL RUMORE

Quando si riconosca la presenza di componenti tonali (suoni puri) nel rumore si procede ad una verifica indicata dall'art. 5 dell'All. B. Si effettua un'analisi spettrale del rumore per bande di  $1/3$  di ottava.

Quando, all'interno di una banda di  $1/3$  ottava, il livello di pressione sonora di ambedue le bande adiacenti viene riconosciuta la presenza di componenti tonali penalizzabili nel rumore, vedi figura 38. In tal caso il valore del rumore misurato in  $Leq(A)$  dev'essere maggiorato di 3 dB(A).

### 6.6.3. PRESENZA DI COMPONENTI IMPULSIVE E TONALI NEL RUMORE.

Qualora si presentino entrambi i casi visti in precedenza allora il valore del rumore misurato in  $Leq(A)$  dev'essere maggiorato di 5 dB(A).

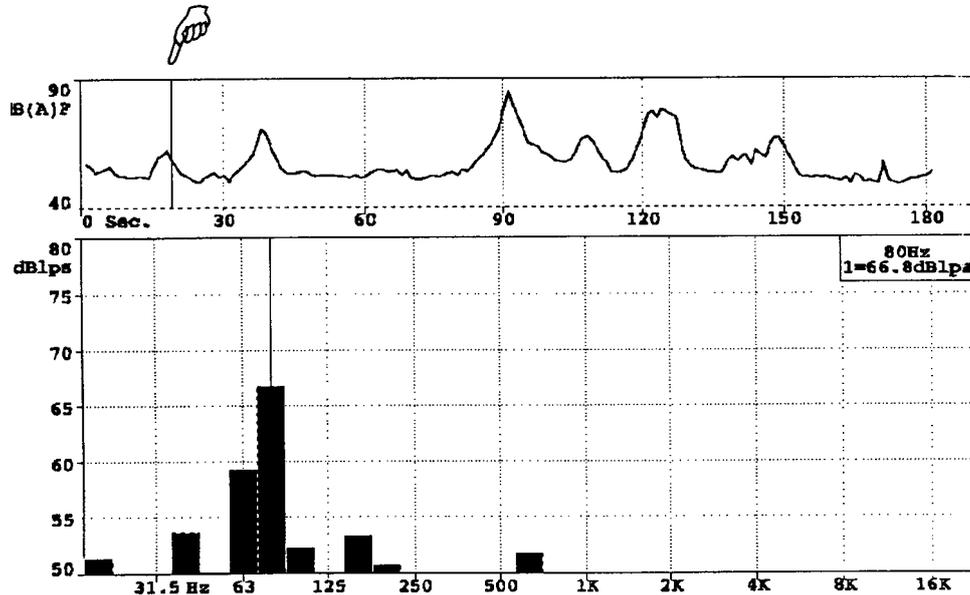


Fig. 7.4a.- Autoveicolo. Tono puro alla frequenza di 80 Hz, e 66.8 dB(A), distintamente udibile.

Figura 91: Rilievo di una componente tonale come indicato dal DPCM 1-3-91

Nel caso di rumore a tempo parziale esso deve persistere per almeno un'ora. Per durate comprese fra 15 minuti ed un'ora si diminuisce il valore di  $Leq(A)$  di 3 dB(A) e per quelle inferiori a 15 minuti di 5 dB(A).

### 6.7. DEFINIZIONI DEI TEMPI DI MISURA NEL DPCM 1-3-91.

Il D.P.C.M. 1/3/91 stabilisce in modo chiaro come effettuare le misure e in particolare definisce:

- **Tempo di Riferimento:** l'intervallo di tempo all'interno del quale si determina la rumorosità ambientale e al quale vanno riferiti i dati rilevati. Ad esempio si può stabilire un tempo di riferimento per il periodo diurno e per il periodo notturno;
- **Tempo di Osservazione:** All'interno del tempo di riferimento si individuano uno o più tempi di osservazione (TO) in ciascuno dei quali il livello del rumore presente caratteristiche di variabilità omogenee;
- **Tempo di Misura:** All'interno di ciascun tempo di osservazione si individua un tempo di misura (TM) di durata pari o inferiore al tempo di osservazione in funzione delle caratteristiche di variabilità del rumore. Ad esempio si può avere un tempo di osservazione TO = 1 ora e tempo di misura TM = 10 minuti.

Nella Figura 92 è possibile rendersi conto dei tre riferimenti temporali.

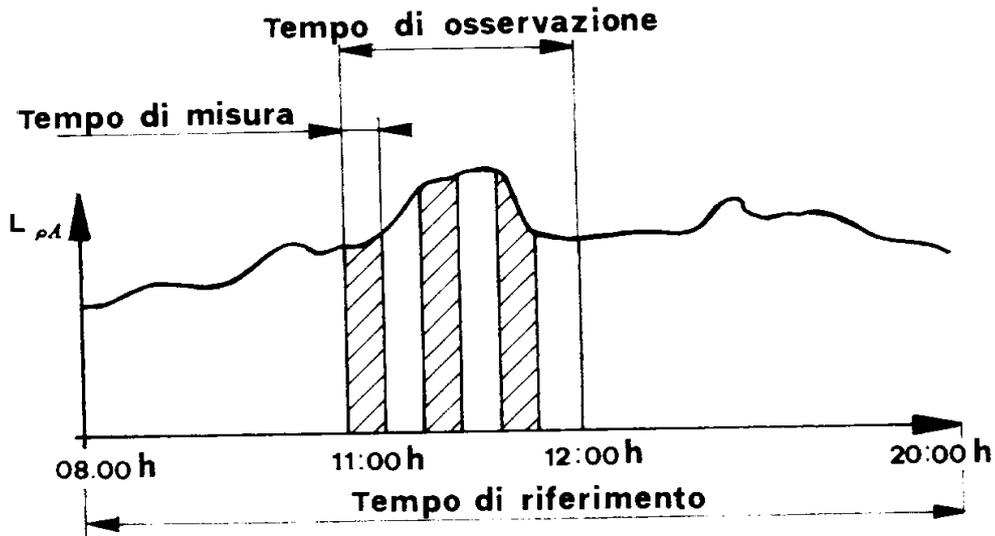


Figura 92: Tempo di riferimento, di osservazione e di misura secondo il DPCM 1-3-91

## 6.8. COME EFFETTUARE LE MISURE

Il D.P.C.M. 1/3/91 indica, nell'allegato B, le modalità di effettuazione delle misure di livello di pressione equivalente:

- Le misure devono essere effettuate con la scala di pesatura **A**;
- Il microfono deve essere posto ad 1,2- 1,5 m da terra e ad almeno 1 m dalle pareti o ostacoli in genere e deve essere orientato verso la sorgente di rumore la cui provenienza sia identificabile.
- L'operatore deve mantenersi a sufficiente distanza dal microfono per non interferire con le misure;
- Le misure debbono essere arrotondate a 0,5 dB;
- Il microfono deve essere munito di cuffia antivento;
- Nel caso di edifici con facciata a filo della sede stradale il microfono deve essere collocato ad 1 m dalla facciata;
- Le misure all'interno degli edifici devono essere effettuate a finestre aperte e ad 1 m da esse.
- La velocità del vento deve essere compresa fra 1 e 5 m/s;

Le misure non debbono essere influenzate dalle condizioni meteorologiche esterne. Nella misura in interni il microfono deve essere posto in modo che il suo asse sia nella direzione di provenienza dell'onda diretta.

Durante le misurazioni non debbono essere presenti altre persone in prossimità del microfono onde evitare effetti di schermatura (vedi Figura 93 in alto).

Se sono presenti toni puri distintamente udibili si procederà alla verifica della posizione del microfono nel campo delle onde stazionarie (nodi e ventri) che necessariamente si verranno a formare: l'operatore dovrà mantenere il microfono opportunamente distante dal corpo e spostarlo nelle varie direzioni in modo da individuare il punto di misura massima (*ventre*).

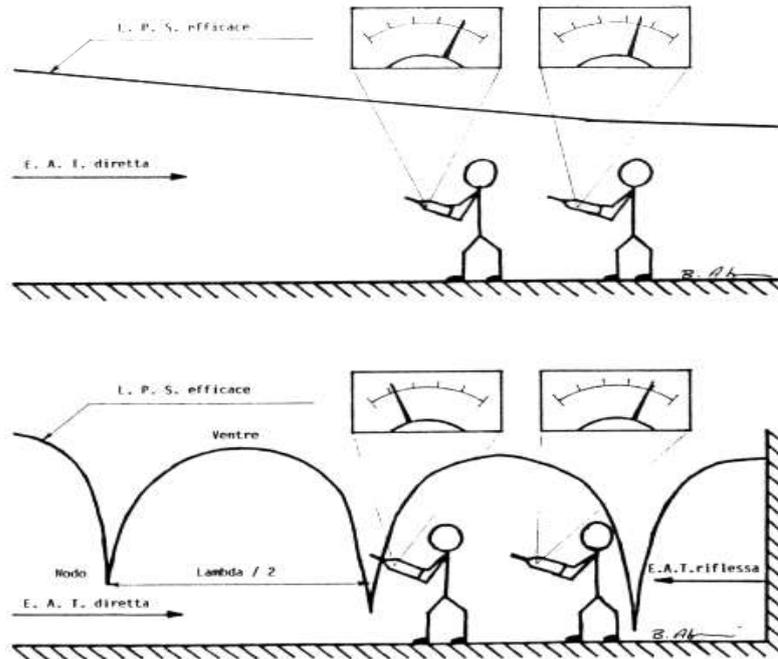


Figura 93: Tecnica di misurazione in corrispondenza di un ventre e di un nodo

I risultati delle misure effettuate debbono essere riportati nelle relazioni con tutte le descrizioni operative indicate dal Decreto. I dati raccolti in numero significativo possono essere sintetizzati in una breve analisi statistica avente le seguenti definizioni fondamentali.

Tali relazioni statistiche possono oggi facilmente essere applicate mediante un qualunque foglio elettronico che provvede a fornire sia i valori statistici che le rappresentazioni grafiche opportune. Il valore medio è dato dalla relazione:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N} \quad [78]$$

con  $x_i$  valori delle misure effettuate,  $N$  numero totale delle misure. Nel caso di più misure effettuate nello stesso sito si può effettuare il calcolo di Leq mediante la relazione:

$$L_{eqA,T} = 10 \text{Log} \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0.1L_{pAi}} \right] \quad \text{in dB(A)} \quad [79]$$

con  $L_{pA}$  livello di pressione filtrato con la scala A del fonometro. La varianza è data da:

$$S^2 = \sum_{i=1}^N \frac{x_i - \bar{X}}{N-1} \quad [80]$$

e la deviazione standard da:

$$D_s = s = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{X})^2}{N-1}} \quad [81]$$

I coefficienti di regressione lineare sono dati dalle relazioni:

$$b = \frac{\sum x_i y_i - \frac{\sum x_i \sum y_i}{N}}{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{N}}, \quad a = \left[ \frac{\sum y_i}{N} - b \frac{\sum x_i}{N} \right] \quad [82]$$

e l'indice di correlazione è dato dalla relazione:

$$r = \frac{\sum x_i y_i - \frac{\sum x_i \sum y_i}{N}}{\left\{ \left[ \sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{N} \right] \left[ \sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{N} \right] \right\}^{1/2}} \quad [83]$$

Le relazioni statistiche sopra esposte possono oggi facilmente essere applicate mediante un qualunque foglio elettronico che provvede a fornire sia i valori statistici che le rappresentazioni grafiche opportune. Il D.P.C.M. 1/3/91 prescrive che i risultati debbono essere trascritti in un rapporto contenente almeno le seguenti indicazioni:

- data, luogo ed ora del rilevamento;
- tempo di riferimento, di osservazione e di misura;
- strumentazione impiegata e grado di precisione;
- valori di LEQ(A) rilevati del rumore residuo e del rumore ambientale e relativa differenza;
- classe di destinazione d'uso alla quale appartiene il luogo di misura e relativi valori massimi di esposizione;
- giudizio conclusivo.

E' opportuno, come indicato anche da altre normative regionali, indicare anche:

- lo scopo dell'indagine;
- la descrizione delle sorgenti di rumore, attuali o previste;
- la natura e lo stato delle superfici e degli ostacoli presenti tra le sorgenti e i punti di misura;
- le condizioni meteorologiche riscontrate durante le misurazioni (ad esempio, piovoso, secco, umido, nuvoloso, soleggiato,...).

Nel caso di rilevazioni di mappe acustiche occorre distanziare le curve di livello di 5 dB e usare colorazioni ben visibili. Oltre alle mappe si possono fornire tabelle e grafici con l'indicazione della statistica elementare dei descrittori misurati.

## 6.9. ADEGUAMENTO AI LIMITI DI RUMOROSITÀ

L'Art. 3 del D.P.C.M. 1-3-91 stabilisce che gli impianti a ciclo produttivo che operano nelle zone non esclusivamente industriali debbono adeguarsi al livello differenziale limite entro cinque anni dall'entrata in vigore del decreto eventualmente avvalendosi di norme di delocalizzazione degli impianti.

Le Imprese possono presentare alle Regioni un piano di graduale risanamento con l'indicazione del tempo necessario a realizzarlo. Il piano deve essere approvato dalle Regioni entro sei mesi dalla presentazione. I piani di risanamento debbono contenere le seguenti indicazioni:

- l'individuazione della tipologia ed entità dei rumori presenti, incluse le sorgenti mobili, nelle zone da risanare;
- i soggetti a cui compete l'intervento;
- le modalità ed i tempi per il risanamento ambientale;
- la stima degli oneri finanziari ed i mezzi necessari;
- le eventuali misure cautelari a carattere d'urgenza per la tutela dell'ambiente e della salute pubblica.

Le regioni, in base all'art. 3 del D.P.C.M. 1-3-91, dovrebbero predisporre un piano regionale annuale di intervento per la bonifica dall'inquinamento acustico.

## 7. IL D. LGS 277/91

Come si è già detto, l'Italia è piuttosto restia ad occuparsi di benessere e sicurezza dei cittadini. Lo fa solo per effetto di direttive o di norma europee che è obbligata a recepire. Le direttive europee 80/1107/CEE, n.82/605/CEE e n. 88/642/CEE avevano posto l'attenzione al rischio nei luoghi di lavoro. Il D.Lgs. 277/91 recepisce queste direttive e, per la parte relativa al rischio uditivo, stabilisce le procedure operative per la prevenzione del rischio uditivi nei luoghi di lavoro.

### 7.1. IL D.LGS. 277/91

Questo Decreto Legislativo ha come titolo: *Attuazione delle direttive n. 80/1107/CEE, n.82/605/CEE e n. 88/642/CEE in materia di protezione dei lavoratori contro i rischi derivanti da esposizione ad agenti chimici, fisici e biologici durante il lavoro, a norma dell'art. 7 della L. 30-07-1990 n. 212.*

Esso é molto articolato e riporta limiti di tollerabilità per sostanze chimiche, fisiche e biologiche.

Nel Capitolo IV esso reca norme per la Protezione dei lavoratori contro i rischi di esposizione al rumore durante il lavoro. Esso stabilisce le misure di tutela per la sicurezza dei lavoratori durante il lavoro: in particolare si riportano qui alcune delle azioni principali che risultano essere:

- a) *la valutazione da parte del datore di lavoro dei rischi per la salute e la sicurezza;*
- b) *utilizzazione limitata dell'agente sul luogo di lavoro;*
- c) *limitazione al minimo del numero di lavoratori che sono o possono essere esposti;*

- d) *controllo dell'esposizione dei lavoratori mediante la misurazione dell'agente.*
- e) *misure da attuare, quando sia superato un valore limite, per identificare le cause del superamento ed ovviarvi;*
- f) *misure tecniche di prevenzione;*
- g) *misure di protezione collettiva;*
- h) *uso dei segnali di avvertimento e di sicurezza;*
- i) *misure di protezione comportanti l'applicazione di procedimenti e metodi di lavoro appropriati;*
- j) *misure di protezione individuale, da adottare soltanto quando non sia possibile evitare in altro modo un'esposizione pericolosa;*
- k) *misure di emergenza da attuare in caso di esposizione anormale;*
- l) *misure igieniche;*
- m) *informazione e formazione completa e periodica dei lavoratori ovvero dei loro rappresentanti sui rischi connessi all'esposizione, i metodi per la valutazione dei rischi;*
- n) *attuazione di un controllo sanitario dei lavoratori;*
- o) *tenuta e aggiornamento di registri indicanti livelli di esposizione;*
- p) *accesso dei lavoratori o dei loro rappresentanti alle misure di esposizione;*
- q) *accesso di ogni lavoratore interessato ai risultati dei propri controlli sanitari;*
- r) *un sistema di notifica alle competenti autorità statali o locali delle attività che comportano esposizione ad agenti da controllare;*

## **7.2. OBBLIGHI PER I DATORI DI LAVORO E PER I LAVORATORI**

Il D.Lgs. n. 277/91 prevede una serie di obblighi per i datori di lavoro, dei dirigenti o dei loro preposti che si conformano alle azioni prima elencate.

Essi debbono informare i lavoratori dei rischi che possono correre per esposizione ad agenti da controllare, permettono ai lavoratori di verificare l'applicazione delle misure di tutela della salute e di sicurezza, forniscono i necessari ed idonei mezzi di protezione, esigono e dispongono l'osservazione delle norme di sicurezza aziendali ed infine esigono l'osservanza degli obblighi di controllo da parte del medico competente.

Essi ancora debbono informare di eventuali rischi anche i lavoratori autonomi e le ditte esterne che prestano servizi all'interno dei loro stabilimenti. Questi operatori secondari debbono, a loro volta, assicurare la tutela dei loro dipendenti in relazione all'esposizione di questi ultimi all'azione di agenti da controllare.

I lavoratori hanno l'obbligo di osservare le norme del D.L. e quanto predisposto dal datore di lavoro per la sicurezza e l'incolumità dei dipendenti. Debbono usare in modo appropriato i dispositivi di sicurezza, segnalano immediatamente le eventuali deficienze dei dispositivi di sicurezza, non rimuovono o modificano i dispositivi di sicurezza, non compiono di propria iniziativa operazioni o manovre non di loro competenza che possono compromettere la protezione o la sicurezza e infine si sottopongono a controlli sanitari.

## **7.3. OBBLIGHI DEL MEDICO COMPETENTE**

Il D.L. 277/91 prevede che il Medico competente, a cura e spese del datore di lavoro, abbia i seguenti obblighi:

1. *accertare lo stato di salute dei lavoratori;*

2. esprimere giudizi di idoneità specifica al lavoro;
3. istituire una cartella clinica per ciascun lavoratore;
4. fornire al lavoratore spiegazioni sui controlli sanitari effettuati;
5. informare i lavoratori dei controlli sanitari effettuati;
6. visitare gli ambienti di lavoro almeno due volte l'anno;

Il medico competente può allontanare, anche temporaneamente, un lavoratore dal suo posto di lavoro per motivi sanitari. Il lavoratore può presentare ricorso avverso tale decisione all'organo di vigilanza. Il lavoratore che viene spostato dalle sue mansioni originali conserva il trattamento economico che gli competeva nella precedente mansione.

Il periodo massimo dell'allontanamento temporaneo deve essere previsto dai contratti nazionali.

## 7.4. CAP. IV: PREVENZIONE DEI LAVORATORI

Questo capitolo reca le disposizioni di legge per la tutela dei lavoratori per l'esposizione al rumore. Sono definite le finalità e riportate alcune definizioni importanti.

- **Esposizione quotidiana personale** di un lavoratore al rumore: é l'esposizione del lavoratore nelle otto ore lavorative ed é data dalla relazione:

$$L_{EP,d} = L_{Aeq,Te} + 10 \text{Log} \frac{T}{T_e} \quad [84]$$

ove è:

$$L_{Aeq,Te} = 10 \text{Log} \left\{ \frac{1}{T_e} \int_0^{T_e} \left[ \frac{p_A(t)}{p_0} \right]^2 dt \right\}$$

con:

- $T_e$  durata quotidiana di esposizione personale del lavoratore al rumore, ivi compresa la quota giornaliera di lavoro straordinario;
- $T_D$  pari a 8 ore, cioè 28800 s;
- $P_0$  20  $\mu\text{Pa}$ , pressione di riferimento.

L'esposizione quotidiana personale non tiene conto degli effetti di un qualsiasi mezzo individuale di protezione.

$$L_{EP,w} = 10 \text{Log} \left[ \frac{1}{5} \sum_{k=1}^m 10^{0,1(L_{EP,d})_k} \right] \quad [85]$$

ove  $(L_{EP,w})_A$  rappresentano i valori quotidiani di  $L_{EP,d}$  per ciascuno degli  $m$  giorni di lavoro della settimana considerata.

- **Esposizione settimanale professionale** di un lavoratore al rumore:  $(L_{ep,w})$ : é la media settimanale dei valori quotidiani  $L_{ep,d}$  valutata sui giorni lavorativi della settimana e data da:

La definizione di Livello di esposizione quotidiana al rumore é da intendersi come una definizione ad intervallo prefissato (tempo  $T_0$  di ore quotidiane di lavoro) del Livello Equivalente  $L_{Aeq,T_0}$ . Questo tipo di parametro é puramente strumentale e può essere determinato con uno strumento di misura adeguato (fonometro integratore e dosimetro personale). Gli inconvenienti che la definizione di  $L_{EP}$  reca in sé sono di scarsa correlazione alla variabilità complessiva del rumore potendosi avere lo stesso  $L_{EP}$  con un rumore costante di pari livello o con un rumore che vari anche fortemente attorno a questo valore.

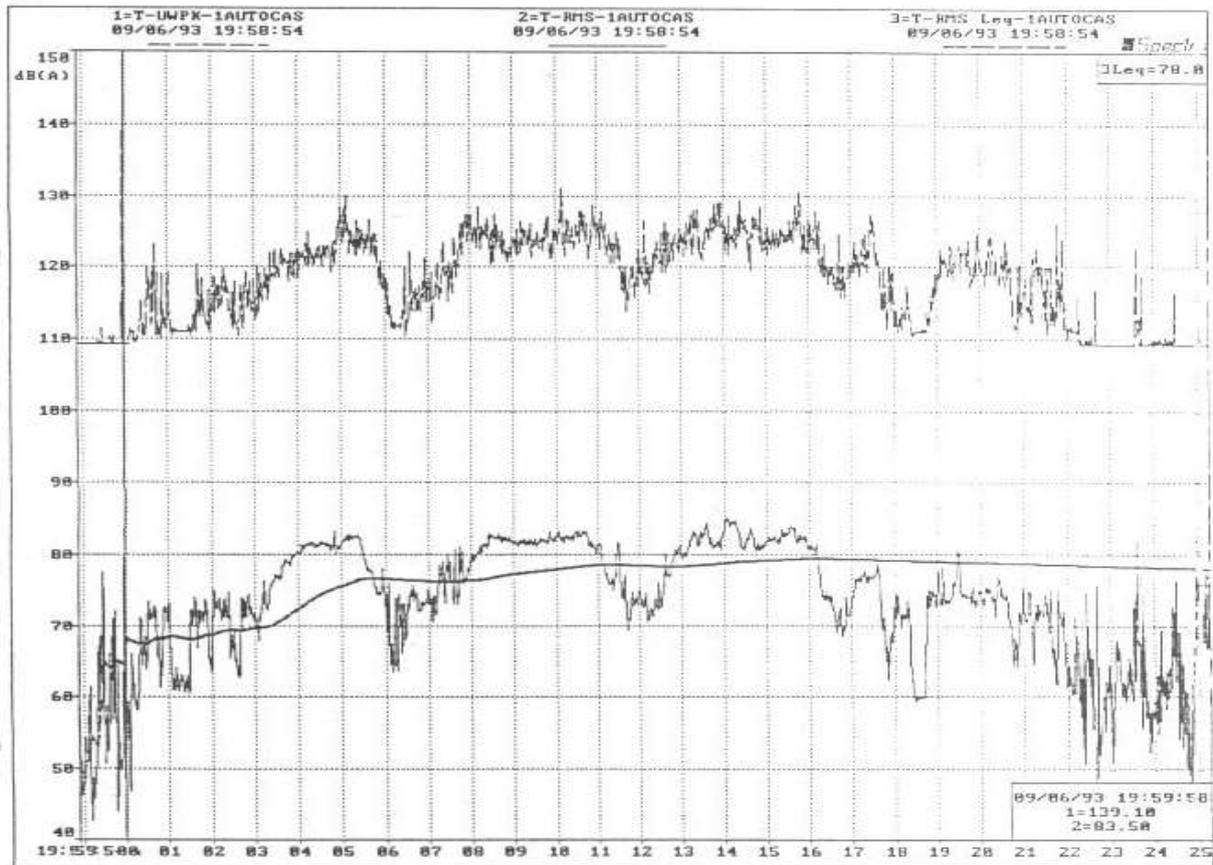


Figura 94: Andamento del LPS, del Leq e del livello massimo di picco non pesato.

Ad esempio nella Figura 94 si vede come Leq cresca con il valore medio del livello e sia poco influenzato dalle oscillazioni e quindi dai valori minimi e massimi dei livelli mentre il livello di picco massimo non pesato sia notevolmente elevato (esempio di. Rumorosità interna ad un autoveicolo).

Per questo motivo il DL 277/91 prescrive che si misuri anche il livello massimo di pressione non pesato e che si controlli che questo non superi mai i **140 dBA**.

## 7.5. VALUTAZIONE DEL RISCHIO

Il datore di lavoro procede alla valutazione del rumore durante il lavoro al fine di identificare i lavoratori ed i luoghi sui quali effettuare misure preventive e/o protettive. La valutazione é programmata e deve essere effettuata da personale competente con metodi e strumentazione adeguati.

Le misurazioni debbono essere ripetute qualora ci siano cambiamenti di macchine o cicli di lavorazione. I criteri e le modalità di misura debbono essere messi a disposizione dal datore di lavoro mediante un rapporto scritto.

Il datore di lavoro deve ridurre la minimo i rischi da esposizione al rumore mediante procedure tecniche, organizzative e procedurali concretamente attuabili.

Se in un luogo di lavoro si supera la dose giornaliera di **90 dBA** oppure il livello di pressione massimo supera i **140 dB** (200 Pa) occorre esporre una segnaletica adeguata, perimetrare i luoghi e limitarne l'accesso.

Se l'esposizione quotidiana supera **80 dBA** il datore di lavoro informa i lavoratori su:

- i rischi per l'udito dall'esposizione al rumore;

- le misure adottate in applicazione delle presenti norme;
- le misure di protezione cui i lavoratori debbono conformarsi;
- la funzione dei mezzi individuali di protezione, le circostanze in cui ne è previsto l'uso e le modalità d'uso;
- il significato e il ruolo del controllo sanitario;
- i risultati ed il significato delle valutazioni effettuate.

Se l'esposizione quotidiana supera gli **85 dBA** occorre fornire al personale un'adeguata preparazione su:

- l'uso corretto dei mezzi individuali di protezione;
- l'uso corretto delle macchine e degli utensili al fine di ridurre il rischio uditivo.

## **7.6. USO DEI MEZZI INDIVIDUALI DI PROTEZIONE**

Quando l'esposizione al rumore **può superare 85 dBA** il datore di lavoro è tenuto a mettere a disposizione dei lavoratori i mezzi individuali di protezione dal rumore. Questi debbono essere adattati alle condizioni di lavoro del lavoratore.

***I mezzi di protezione individuale sono considerati validi ai fini del D.L. 277/91 solo se mantengono un livello di esposizione personale quotidiana inferiore a 90 dBA.***

***I lavoratori la cui esposizione giornaliera supera i 90 dBA debbono usare i mezzi di protezione individuali.***

***I lavoratori sottoposti ad esposizione al rumore superiore agli 85 dBA debbono sottoporsi a controllo del medico indipendentemente dall'uso di mezzi di protezione individuale.***

Il controllo deve prevedere la misura della soglia uditiva, la verifica dello stato di salute generale e della sensibilità acustica individuale.

La frequenza dei controlli è stabilita dal medico e non può superare l'intervallo di due anni se l'esposizione non supera 90 dBA ed un anno se l'esposizione supera i 90 dBA.

I lavoratori esposti a rumore fra 80 e 85 dBA possono richiedere di essere controllati dal medico. Il datore di lavoro, in conformità al parere del medico, adotta misure preventive e protettive per singoli lavoratori al fine di favorire il recupero audiologico.

Tali misure possono comportare anche la riduzione dell'esposizione giornaliera mediante riorganizzazione del ciclo produttivo.

L'organo di vigilanza controlla l'applicazione del presente D.L. Il datore di lavoro comunica all'organo di vigilanza gli eventuali superamenti dei limiti di esposizione al rumore e i rimedi proposti.

## **7.7. DEROGHE PER SITUAZIONI PARTICOLARI**

Il datore di lavoro può chiedere deroghe all'applicazione dell'art. 43 (applicazione dei mezzi individuali di protezione del rumore) se non è in grado con misure tecniche o organizzative di ridurre l'esposizione al di sotto di 90 dBA, se non è possibile evitare tale rischio con alcun mezzo.

Le richieste vanno inviate al Ministero del Lavoro e della Previdenza sociale ovvero al Ministero dell'industria, del commercio e dell'artigianato per le attività estrattive.

La concessione delle deroghe è condizionata all'intensificazione del controllo sanitario da parte del medico competente.

Le concessioni vengono rilasciate dai ministeri di concerto con il Ministero della Sanità. I lavoratori esposti a rumori che superano i limiti di 85 e 90 dBA sono iscritti nel registro previsto dal presente D.L. 277/91.

Detto registro deve essere consegnato in copia all'ISPESL e alla USL competente per territorio.

Il datore di lavoro deve anche comunicare l'eventuale cessazione del rapporto di lavoro. Il registro può essere richiesto dall'ISPESL o dalla USL per controlli periodici.

L'applicazione del D.L. 277/91 prevede al Capo V **Norme penali** sia per il datore di lavoro che per il lavoratore che non utilizza le protezioni individuali dal rumore.

## 7.8. SCHEDE DI VALUTAZIONE DEL RUMORE

Per la valutazione del rischio derivante dal rumore (D.Lgs 277/91) si adotta la seguente scheda che sintetizza un prontuario degli adempimenti di sicurezza.

Adempimenti	Tempi/Periodicità	Norme	Soggetti obbligati	Enti preposti	Sanzioni
<i>Valutazione del rischio</i>	Inizio delle attività ogni volta che vi siano mutamenti organizzativi che influiscano sulla rumorosità	D.Lgs 15.8.1991 n. 277 art. 40 a Allegato VI.	Datore di lavoro	USL	Arresto da tre a sei mesi o ammenda da L. 10 milioni a L. 50 milioni.
<i>Formazione</i> (sull'uso corretto dei mezzi individuali di protezione dell'udito, sull'uso corretto, ai fini della riduzione al minimo dei rischi per l'udito, degli utensili, macchine, apparecchiature che possono produrre un'esposizione quotidiana al rumore superiore a 85 dBA)	Entro 30 giorni da quando l'esposizione quotidiana personale di un lavoratore al rumore abbia superato <b>90 dBA</b> o il valore della pressione acustica istantanea non ponderata sia stato superiore a <b>140 dBA</b> .	D.Lgs 15.8.1991 n. 277, art. 45	Datore di lavoro/Medico competente.	USL	Arresto da tre a sei mesi o ammenda da L. 10 milioni a L. 50 milioni.
<i>Informazione</i> (sui rischi derivanti dall'esposizione al rumore, sulle misure adottate, sulle misure di protezione adottate, sulla funzione dei mezzi individuali di protezione, sul controllo sanitario, sui risultati della valutazione)	Qualora l'esposizione quotidiana personale di un lavoratore al rumore superi <b>80 dBA</b>	Art 42, comma 1.	Datore di lavoro	USL	Arresto da 2 a 4 mesi o ammenda da L. 3 milioni a L. 15 milioni.
<i>Controllo Sanitario</i>	Qualora l'esposizione quotidiana personale di un lavoratore al rumore superi gli <b>85 dBA</b> . Tra 80 e 85 dBA solo se lo richiede il lavoratore e il Medico competente ne confermi l'utilità.	D.Lgs 15.8.1991 n. 277, art. 44 e Allegato VII	Datore di lavoro/Medico competente.	USL	Arresto da 2 a 4 mesi o ammenda da L. 3 milioni a L. 15 milioni.
<i>Comunicazione all'organo di vigilanza delle misure per la</i>	Entro 30 giorni da quando l'esposizione quotidiana personale di un lavoratore	D.Lgs 277/91 art. 45.	Datore di lavoro/Medico competente	USL	Arresto da 3 a 6 mesi o ammenda da

<i>riduzione del rumore.</i>	al rumore abbia superato 90 dBA o il valore della pressione acustica istantanea non ponderata sia stato superiore a 140 dBA.				L. 10 milioni a L. 50 milioni.
<i>Registrazione dell'esposizione dei lavori</i>	Qualora l'esposizione quotidiana personale al rumore sia superiore a <b>90 dBA</b> .	D. Lgs 277/91, art. 49	Datore di lavoro	ISPESL - USL	Arresto da 2 a 4 mesi o ammenda da L. 3 milioni a L. 15 milioni.
<i>Deroghe all'art 43 per situazioni lavorative particolari (Nota).</i>		D. Lgs 277/91, Art 48	Datore di lavoro	Ministero del Lavoro per le attività estrattive e Ministero dell'Industria.	
<p><b>NOTA:</b> Il datore di lavoro ha i seguenti obblighi:</p> <p>a) consegna copia del registro all'ISPESL e alla USL competente per territorio cui comunica, ogni tre anni e comunque ogni qualvolta l'ISPESL medesimo ne faccia richiesta, le variazioni intervenute;</p> <p>b) consegna, a richiesta, all'organo di vigilanza e all'Istituto Superiore di sanità copia del predetto registro;</p> <p>c) comunica all'ISPESL e alla USL competente per territorio la cessazione del rapporto di lavoro, con le variazioni sopravvenute dall'ultima comunicazione;</p> <p>d) consegna all'ISPESL e alla USL competente per territorio, in caso di cessazione dell'attività, il registro;</p> <p>e) richiede all'ISPESL e alla USL competente per territorio copia delle annotazioni individuali in caso di assunzione di lavoratori che abbiano in precedenza esercitato attività che comportano le condizioni di esposizione di cui all'art. 41;</p> <p>f) comunica ai lavoratori interessati tramite il medico di competenza. Le relative annotazioni contenute nel registro e nella cartella sanitaria e di rischio.</p>					

Tabella 15: Adempimenti per l'applicazione del D.Lgs 277/91

## 7.9. TEMPO DI ESPOSIZIONE E LIVELLO DI ESPOSIZIONE PERSONALE

Qualora il livello di esposizione personale superi il valore di 80 dBA occorre variare il tempo di esposizione in modo da preservare il rischio di danno uditivo. Sono in uso due criteri detti di Intensità di scambio:

### 7.9.1. CRITERIO 3-DB

Poiché l'energia sonora raddoppia con un incremento di 3 dB allora si dimezza il tempo di esposizione per ogni 3 dB di incremento del livello di esposizione. Questo criterio (conservativo e cautelativo) non tiene conto del recupero fisiologico dell'uomo e dei rumori intermittenti. Esso è supportato da osservazioni epidemiologiche su popolazioni esposte a rumori continui ed è stato adottato in molte norme internazionali.

### 7.9.2. CRITERIO 5-DB

Osservazioni sperimentali hanno mostrato che riducendo di metà il tempo di esposizione (anche a rumori intermittenti) si può innalzare il livello di 5 dB senza aumentare il rischio di danno uditivo sull'uomo. Questo criterio tiene in parte conto del recupero fisiologico dell'uomo ed è stato adottato da numerose nazioni, fra cui gli USA.

## 7.10. STRUMENTI PER MISURARE IL LIVELLO DI ESPOSIZIONE

Normalmente si utilizza un particolare fonometro integratore di ridotte dimensioni e con lettura limitata dei dati detto **dosimetro** personale. Esso consente di misurare il livello di esposizione giornaliero, il livello di picco e il livello massimo.



Figura 95: Dosimetro personale per il rumore

Le dimensioni sono molto contenute e consentono di tenere il dosimetro a contatto con il corpo in modo da correlare l'effettiva esposizione del lavoratore.

I dati che si possono ottenere da un dosimetro personale sono quelli indispensabili per l'applicazione del DL. 277/91. In figura 44 si ha l'andamento di una registrazione di un segnale per un tempo di 3,5 ore. Il grafico superiore riporta l'andamento storico del livello pesato A, del  $Leq(A)$  e del livello di picco non pesato. In basso si hanno le curve statistiche cumulative continue e con passo di 1 dB (FAST).

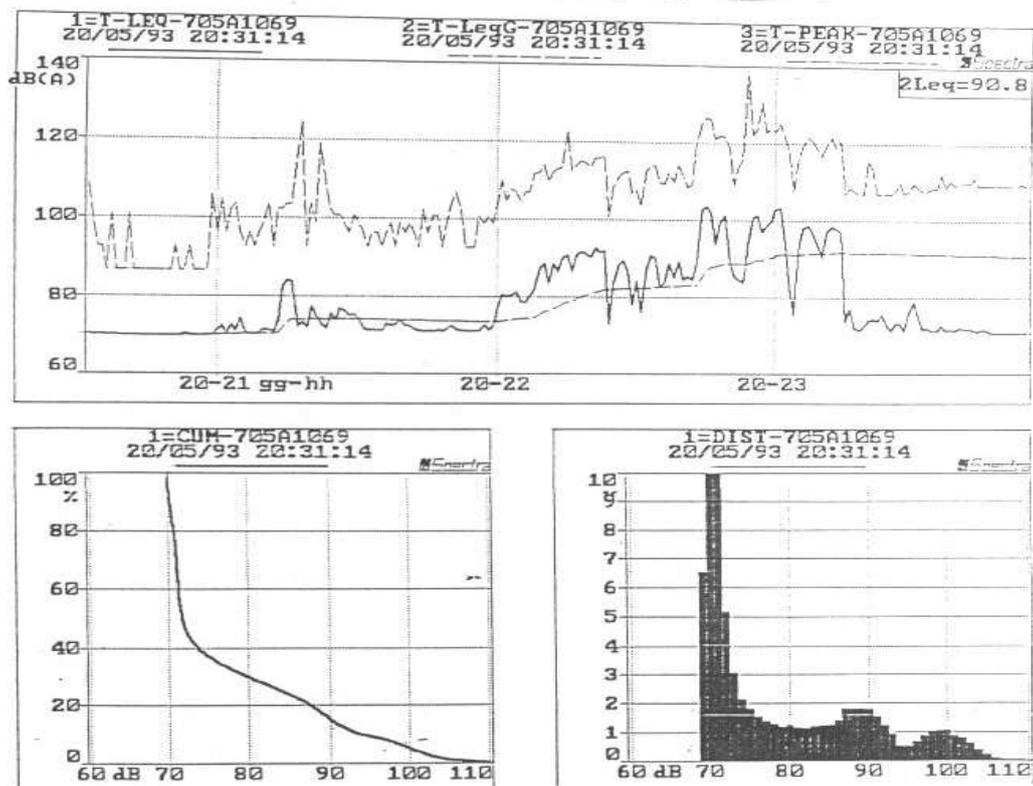


Figura 96: Risultati ottenibili mediante un dosimetro personale.

## 7.11. NORMATIVA NAZIONALE SULLA SICUREZZA DEI LAVORATORI PER IL RUMORE

- D.P.R. 19/3/1956 n. 303: Norme generali per l'igiene del lavoro , art 24.
- D.P.R. 5/5/1975 n. 146: Indennità di rischio al personale civile di ruolo e non di ruolo ed agli operai dello Stato.
- L. 19/11/1984 n. 862: Ratifica ed esecuzione delle convenzioni dell'Organizzazione internazionale del lavoro (OIL) n. 148, 149, 150, 152.
- D.M. 14/6/1988 n. 385: Recepimento della Direttiva CEE n 87/56 del 18/12/1986 di modifica alla Direttiva CEE n 78/1015 relativa al livello sonoro ammissibile e al dispositivo di scappamento dei motocicli.
- D.P.C.M. 1/3/91: Limiti massimi di esposizione al rumore negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno.
- D.L. 15/8/91 n. 277: Attuazione Direttive CEE n 80/1107, n 82/605, n 83/477, n 86/188 e n 88/642 in materia di protezione dei lavoratori contro i rischi derivanti da esposizioni di agenti chimici, fisici e biologici durante il lavoro, a norma dell'art. 7 della L. 3/7/1990 n. 212.
- D.Lgs del 14/08/96 n. 494 e successive modificazioni: La sicurezza nei cantieri temporanei e mobili.

## 7.12. METODI DI CALCOLO APPROSSIMATI DEL RISCHIO Uditivo.

Ai fini del calcolo preventivo dei livelli di esposizione al rumore si può fare riferimento a quanto il D.Lgs 494/94 recita all'art. 16:

### Art. 16. Modalità di attuazione della valutazione del rumore

1. L'esposizione quotidiana personale di un lavoratore al rumore può essere **calcolata in fase preventiva facendo riferimento ai tempi di esposizione e ai livelli di rumore standard individuati da studi e misurazioni la cui validità e' riconosciuta dalla commissione prevenzione infortuni**.
2. Sul rapporto di valutazione va riportata la fonte documentale a cui si è fatto riferimento.
3. Nel caso di lavoratori adibiti lavorazioni e compiti che comportano una variazione notevole dell'esposizione quotidiana al rumore da una giornata lavorativa all'altra può essere fatto riferimento, ai fini dell'applicazione della vigente normativa, al valore dell'esposizione settimanale relativa alla settimana di presumibile maggiore esposizione nello specifico cantiere, calcolata in conformità a quanto previsto dall'articolo 39 del decreto legislativo 15 agosto 1991, n. 277.

Pertanto in fase preventiva è possibile utilizzare studi e misurazioni riconosciuti dalle commissioni di prevenzione infortuni. Uno di questi studi già oggi disponibili è quello del **COMITATO PARITETICO TERRITORIALE PER LA PREVENZIONE INFORTUNI, L'IGIENE E L'AMBIENTE DI LAVORO DI TORINO E PROVINCIA** che ha pubblicato un volume della serie "Conoscere per Prevenire" dal titolo "VALUTAZIONE DEL RISCHIO DERIVANTE DALL'ESPOSIZIONE AL RUMORE DURANTE IL LAVORO NELLE ATTIVITA' EDILI<sup>8</sup>".

In questo volume sono riportati numerosi dati (spettri e tabelle) utili per il calcolo preventivo del rischio uditivo con il metodo semplificato.

---

<sup>8</sup> Edizioni: EDILSCUOLA srl, Via Quarello 15-17, 10135 Torino

Si riporta qui, brevemente, la metodologia. Considerata la giornata lavorativa tipo del lavoratore di cui si desidera valutare il rischio uditivo si calcolano le frazioni di esposizione ad ogni singola sorgente derivante dalla particolare attività considerata.

Di ciascuna sorgente si conosce (perché riportati nei dati sopra indicati) i livelli di pressione (Leq,A) opportunamente misurati con l'ipotesi di regime stazionario.

Si applica, quindi, la seguente relazione di calcolo per il livello di esposizione personale giornaliero:

$$Lep = 10 \log \sum_0^i \frac{P_i}{100} 10^{0,1Leq_i} [dB(A)]$$

ove si ha il seguente simbolismo:

- $Lep$     Livello di esposizione personale giornaliero, dB.A,
- $p_i$     percentuale di esposizione giornaliera alla  $i.ma$  attività;
- $Leq_i$     livello equivalente della  $i.ma$  sorgente, dB.A.

Un esempio può meglio chiarire quanto detto. Si consideri il seguente caso:

NATURA DELL'OPERA: COSTRUZIONI EDILI IN GENERE

TIPOLOGIA: NUOVE COSTRUZIONI

GRUPPO: RESPONSABILE TECNICO DI CANTIERE (GENERICO)

ATTIVITA'	% MEDIATA DI ESPOSIZIONE	MEDIA ENERGETICA Leq (dB.A)
Attività di ufficio	45	68
Installazione cantiere	1	77
Scavi di sbancamento	1	83
Scavi di fondazione	1	79
Fondazioni e strutture piani interrati	2	84
Struttura in c.a.	11	83
Copertura	1	78
Montaggio e smontaggio ponteggi	1	78
Murature	11	79
Impianti	7	80
Intonaci	5	86
Pavimenti e rivestimenti	3	84
Finiture	4	84
Opere esterne	2	79
Fisiologico	5	0
<b>Lep =</b>	<b>80</b>	<b>dB A</b>

Il risultati del calcolo è che il Lep previsto è pari ad 80 dB.A. Analogamente si può procedere per altre situazioni. Ad esempio si consideri il caso:

NATURA DELL'OPERA: COSTRUZIONI EDILI IN GENERE

TIPOLOGIA: NUOVE COSTRUZIONI

## GRUPPO: CAPO SQUADRA (INTONACI INDUSTRIALIZZATI)

ATTIVITA'	% MEDIATA DI ESPOSIZIONE	MEDIAENERGETICA Leq (dB.A)
Preparazione malta	15	84
Spruzzatura e lisciatura	80	89
Fisiologico	5	0
<b>Lep =</b>	<b>88</b>	<b>dB.A</b>

In questo caso si è nella situazione prevista dal D.Lgs 277/91 di Lep compreso fra 85 e 90 dB.A e pertanto occorre informare e formare i lavoratori, predisporre cartelli di avvertimento ed un numero di protezioni acustiche pari al numero di lavoratori interessati alla suddetta attività.

Va ancora tenuto presente che se alcune attività si svolgono in ambienti chiusi allora occorre tenere conto anche degli effetti del riverbero della sala<sup>9</sup> e quindi di un incremento di livello aggiuntivo a quello calcolato.

Pertanto quando si calcolano livelli di esposizione vicini al limite di 90 dB.A è sempre bene procedere con cautela e considerare il calcolo effettuato in difetto rispetto alla realtà.

In situazioni particolarmente delicate e al limite di accettabilità è opportuno utilizzare anche i codici di simulazione numerica, del tipo di quelli indicati in precedenza, che meglio tengono conto della geometria dei luoghi e della fenomenologia degli eventi.

### 7.13. PROTEZIONE DELL'UDITO: MISURE DI SICUREZZA

Il rumore è spesso presente nei cantieri per il funzionamento contemporaneo di varie macchine o per lavorazioni particolari.

In considerazione del fatto che la protezione dal rumore offerta dai presidi in uso non è completa e che sono presenti effetti collaterali, è opportuno prevederne un uso limitato, privilegiando il ricambio degli operatori nelle postazioni a rischio e favorendo l'intervento tecnico di riduzione della rumorosità.

I mezzi personali di protezione più comunemente usati sono le cuffie e gli inserti o tappi: a seconda delle loro caratteristiche questi protettori hanno un diverso grado di attenuazione della rumorosità e quindi la scelta del mezzo di protezione deve essere rapportata al rumore presente nonché, alla sua frequenza.

In presenza di rumori elevati le cuffie sono le migliori protezioni da usare anche se pesanti e ingombranti, la compressione sulle orecchie risulta spesso fastidiosa, sono mal tollerate in ambiente caldo perché, provocano surriscaldamento dei padiglioni auricolari, isolano l'individuo dall'ambiente esterno: non sono quindi adatte per un uso prolungato.

Gli inserti o tappi danno una attenuazione del rumore inferiore rispetto alle cuffie.

A differenza delle cuffie danno un limitato surriscaldamento dell'orecchio e un minore isolamento dell'individuo dall'ambiente esterno, possono essere quindi portati più a lungo.

Possono presentare però alcuni inconvenienti, quali irritazioni o processi infettivi. Il livello di esposizione non deve essere superiore ai 90 dBA.

---

<sup>9</sup> Vedi quanto detto nel paragrafo 3.2.

**NORME DI LEGGE:** Art. 24 DPR 164/1956, Decreto Legislativo 15.8.1991 n. 277.

## 7.14. CUFFIE DI PROTEZIONE DAL RUMORE ED INSERTI ACUSTICI.

Nella Figura 97 é rappresentata una cuffia acustica di protezione dal rumore, ai sensi del D.Lgs 277/91. Tutti gli strumenti di protezione debbono garantire una dose massima giornaliera inferiore a 90 dB.A.



Figura 97: Cuffia di protezione dal rumore conforme alle specifiche del D.Lgs 277/91

Qualora la dose quotidiana personale di esposizione al rumore supera il limite di 90 dB.A o 140 dB di picco massimo non pesato occorre far ricorso ad interventi sulle sorgenti (isolamento, insonorizzazione con cuffie afoniche, trattamento dei locali,...) ovvero a strumenti di protezione personale costituiti essenzialmente da cuffie e da inserti auricolari da inserire nel canale timpanico esterno.

VALORI MEDI DI PROTEZIONE E STANDARD DEVIATION							
Frequenza [Hz]							
Tipo	125	250	500	1000	2000	4000	8000
<i>Inserti Auricolari</i>							
Valori medi	25	24	26	28	36	36	39
Standard deviation	3	4	4	4	3	5	7
<i>Cuffie</i>							
Valori medi	12	21	29	40	40	41	38
Standard deviation	2	2	3	4	4	5	5
<i>Cuffie e Inserti auricolari</i>							
Valori medi	33	42	46	41	52	56	45
Standard deviation	4	5	7	5	5	5	5

Tabella 16: Valori medi di protezione standard per cuffie ed inserti

La protezione fornita é mediamente riportata nella seguente tabella (valori medi e deviazione standard). Alle basse frequenze agiscono bene gli inserti auricolari. Per valori elevati di protezione occorre utilizzare entrambi i dispositivi.

#### 7.14.1. DATI UTILI PER LA RUMOROSITÀ IN CANTIERE

Viene qui riportata una tabella riepilogativa<sup>10</sup> per le lavorazioni ed apparecchiature comuni nei cantieri edili. In ciascuna riga si ha l'indicazione della fonte di rumore, lo spettro a bande di ottava e il livello globale in dB.A.

DENOMINAZIONE	31,5	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K	dB.A
Addetto Clipper Norton CS1P10	78,2	87	84,6	86,7	84,6	84	83,1	90	88,3	80,8	94,1
Addetto martello demolitore	96,9	100,1	105,8	102,3	98,1	92,2	91	93,1	94,3	90,3	101,6
Addetto motopompa Geo-Astra 350 SC	80,1	86,6	89,2	89,1	89,6	90,6	87,2	85,4	84,6	80,4	94,9
Addetto motosega taglio legname tetto	74,9	85,4	103	97,5	98	100,4	93	80	79	72,9	101,7
Addetto pistola	94,6	84	80,7	80,2	83	88,7	86,6	90,8	90,2	90,5	96
Addetto sabbiatura interni	82,4	85,1	89,3	92,3	94,9	97,9	100,7	94,3	89,3	75	104,4
Addetto scanalatrice elettrica	83	88,7	92,9	94,1	94,6	91,1	91,4	87,9	87,8	79,3	97,9
Addetto trapano per rimozione rivestimento	82	88,7	88,3	89,1	92,5	96,3	94,8	84,5	77,9	69,7	100
Battipavimenti	73	80,6	87,7	87,2	91,8	90,5	82,9	70,5	66,8	58,9	93,5
Battitura piastrelle	69,4	85,1	94,8	91,7	91,3	83,2	78,2	71,2	64,5	55	90,9
Bocciardatura nodiglioni in pietra	86,7	90,9	95,5	95,2	89,1	90,4	91,5	87,1	86,9	76,7	96,9
Buco soletta a blocchi con trapano Spit 375	73	70,5	74,5	83,6	87	87,3	83,5	93,7	94,4	92,7	98,2
Cabina escavatore Vaiacar (posa ghiaia)	97,1	91	85,5	86,1	87	85,2	83,7	83	82,7	83,2	91,5
Chiodatura listelli con pistola Hold Her	92	90,9	92	87,4	87,4	88,5	89,1	87,7	88,9	86,6	95,6
Clipper '88 paramano	73,5	74	79,9	82,7	87,6	85,1	88	85,3	78	67,3	92,9
Clipper '92 taglio blocchi cemento umido	70,9	76,2	78,9	82,9	96,6	100,8	96	87,4	83,8	73,9	103,1
Clipper paramano secco	73,5	79,3	84,2	88,1	95,6	96,3	99,9	93,1	86,4	73,5	103,4
Clipper paramano umido	68	75,5	73,6	81,7	95,1	92	91,6	83,7	77,2	66,1	97,3
Clipper taglio blocchi cemento secco	72,2	77,5	80,2	84,2	97,9	102,1	97,3	88,7	85,1	75,2	104,4
Compressore Vangard 5HP	88,6	84	82,4	83	77,9	78,6	90,6	83	83,8	84,6	93,3
Decespuglio con zaino	74,3	90,4	81,5	87,8	91	83,7	81,5	74,8	70,7	63,4	90,6
Demolizione attrezzi manuali	81,3	86,5	86,7	87,1	86,3	89,8	85,2	77,8	74,1	66,9	92,5
Demolizione cls con martello pneumatico	96,9	105,3	103,5	105,5	106,6	98,4	94,9	88,8	89,1	75,2	105,3
Demolizione intonaco con martello medio	76,7	85,2	94,6	91,8	90,2	87,2	84,2	90	92,7	92	96,7
Demolizione intonaco con martello medio	76,7	92,6	101	100,4	98,7	95,1	91,7	95	99,7	93,1	103,5
Demolizione muratura perimetro portante	78,2	90,6	92,1	91,3	92	95,2	90,6	79,2	74,2	64,9	97,8

<sup>10</sup> Fonte: Comitato Paritetico territoriale per la prevenzione infortuni, l'igiene e l'ambiente di lavoro di Torino e provincia

Demolizione pavimento con martello elettr.	83,4	93,5	91,1	92,7	97,4	97,4	93,8	83,6	78,8	68,9	100,8
Disarmo solaio (impatto al suolo)	69,7	68,7	72,6	77,8	78	84,5	88	85,9	81,4	73,5	92,4
Escavatore Bobcat 743 '89	79,5	107,8	91,7	88,2	89,9	89,6	83,3	79,5	73,2	68,6	93,1
Flessibile taglio binari	95,9	86,9	100,4	90	101,1	92,6	92,9	89,2	84,9	91,4	101
Foratura e avvitatura traversine	94,1	88,5	85,7	86,3	85	85,2	85,5	83,5	82,9	82,9	91,7
Foratura e avvitatura viti su traversine	101,2	94,9	93,3	98,6	96,4	94,4	93,4	90,8	86,6	84,7	100,3
Foratura muratura piena trapano HILTI-TE 52	68,8	71,7	71	67,9	69,5	69	76,7	84,6	89,9	88,6	91,3
Foratura muro mattoni e pietre Hiltites HILTI-TE 52	84,4	84,8	84,5	82,8	83,7	85,2	89	93,5	97	94,4	99,5
Grader aperto	77,9	104,1	89,5	90,3	89,2	87,6	83,4	80,1	71,6	63,5	92,1
Grader chiuso	76,9	103,1	88,5	89,3	88,2	86,6	82,4	79,1	70,6	62,5	91,1
Levigatrice piccola e grande	97,6	88,2	85	84,2	84,8	86,4	85,8	85,2	84,6	85	92,7
Macchina battipavimenti	74	79,5	86,4	88,4	92,7	94,2	87,9	76	68,5	59,6	96,5
Macchina per paratie	103,7	93,8	93,5	89,7	89,3	89,1	89	89,1	89	89,3	96,3
Martello compressore	81	94,7	94,6	89,1	85,9	81	85	90,1	89,5	86,8	94,8
Martello Demol silenzioso	75	90,3	86,8	90,8	91,5	91,8	93,8	90,9	88,9	82,7	98,9
Martello Demol silenzioso (grande)	86,8	98,9	93,2	97,1	88,7	86,1	87,6	91	90,4	86,1	96,9
Martello Demol silenzioso piccolo	86,6	97,3	96,6	97,7	96	94,4	91,4	96,5	103,6	94,1	105
Martello demolitore muratura perimetro in c.a	74	85,4	98,3	93,2	95,3	89,6	89,1	93	95,3	93,3	99,8
Martello piccolo - compressore	74,4	87,4	85,2	84	81,8	82	85,1	89,6	95,9	86,7	97
Motocoltivatore Carraro con fresa 14 HP	93	96,4	94,3	92,9	88,1	87,9	85,6	77,1	72,6	65,6	92,6
Operatore Matisa esterno	99,8	90,2	86,5	88	89,4	87,8	85,4	84,5	84,4	84,6	93,5
Operatore quadro comando a terra Matisa	99	89	86,2	87,2	87,4	85,5	85,2	84,2	84,2	88,6	92,6
Operatore Tandem (caterpillar) con vibrazione	108,4	102,5	94,7	90,9	89,5	86,8	84,9	81,6	77	69	92,6
Pala gommata Fiat Allis	91,5	112,7	99,2	93,6	90,6	84	78,1	62,6	61	63,7	92,7
Pannelli con travi Kaufman (disarmo)	75,3	79,2	77,3	87,7	89,9	85,6	87,3	75,8	69,2	61,1	92,3
Paratie monolitiche (op. in cabina)	104,4	92,9	96,7	90,3	90,1	89,1	86,7	83,9	83,5	85,3	94,4
Perforatore elettrico	69,5	75,2	76	82,2	87,4	90,2	90,6	76,8	72,6	66,5	94,7
Perforazione	84,4	81,6	85,3	86,9	91,6	92,5	94,8	90,5	85,9	77,3	99,2
Piastra battente	78,1	88,3	90	86,6	88,8	86,4	83	81,8	78,3	73,7	91,5
Picchiatello su Fiat Hitachi	77,3	84,9	84,9	88	95,1	88,8	85,9	81,7	74,3	64,3	95
Picchiatello su Fiat Hitachi	81,7	91,6	92,7	94,5	95,7	93,8	89,2	87,1	78,2	67,9	98,1
Picchiatello su Fiat Hitachi	85,4	95,3	96,4	98,2	99,4	97,5	92,9	90,8	81,9	71,6	101,8
Pistola	64,7	67,8	73,5	89,5	86,6	86,2	83,9	74,6	69,8	61,2	90,5
Pistola per intonaco	103,4	93,6	90,2	89,3	89,1	89,5	89,8	89,4	89,3	89,7	96,7
Pistola per intorno modello Tigre	75,8	76,5	83,6	82,5	84,7	88	92,4	94,9	96,1	93,2	100,2
Pistola per intorno modello Tigre	75,1	75,8	82,9	81,8	84	87,3	91,7	94,2	95,4	92,5	99,5
Pistola per scagliola intonaco	72,8	68,1	87,9	83,9	87,2	84,9	86,2	72,1	68,1	61	90,7
Posa battiscopa con trapano e avvitatore	58,3	60,7	62,8	68,1	76	83,5	87,2	89,4	83,3	81,2	93,5

Posa guaina (cannello)	79,3	89,3	91,9	91,2	89,8	86,9	78,9	68,9	63,6	58,1	91,1
Rifinitrice Marini P230	72,2	108,3	95,8	91,8	95,9	94,5	90,6	88,7	84,9	77,2	98,9
Rincalzatrice Matisa porte aperte	94	83,3	81,3	82,6	86,9	87,9	85,3	78,6	74,7	72,8	91,6
Rincalzatrice Matisa porte chiuse	101,8	91,3	86,6	92,9	87,4	86,5	82,1	78,6	78,1	80,3	91,4
Rullo "Bitelli"	79,2	90,7	102,6	89	88,7	85,6	79,3	64,6	59,4	57,8	91,4
Rullo compressore Bitelli	75	82,6	84	83,6	90,2	88,7	83,3	69,8	64,8	58,4	92
Rullo compressore DTV 25 Bitelli	93,6	105	105,4	95,6	94,5	91,6	89,5	86,5	83,6	74,8	97,9
Rullo compressore Dynapac	92,8	105,8	101,8	96,2	98	89,9	85	70,9	66,1	57,6	97,4
Rullo compressore Dynapac aperto gommato	100,7	107,2	104,4	103,8	93,8	92,2	85,7	68,7	62,6	57,7	98,7
Rullo compressore Dynapac aperto gommato	115,9	110,5	106,8	99,9	96,3	93,2	84,3	68,4	59,2	61,1	98,7
Rullo compressore Dynapac chiuso gommato	101,8	108,3	105,5	104,9	94,9	93,3	86,8	69,8	63,7	58,8	99,8
Rullo compressore Dynapac chiuso gommato	101,8	108,3	105,5	104,9	94,9	93,3	86,8	69,8	63,7	58,8	99,8
Rullo EL-MA RAE 100 gommato vibrato	102,9	100,5	100,6	94,9	85,5	84,9	81,3	74,5	67,1	59,1	91,6
Scalpellatura su soletta c.a. 425 al 300	71,7	71,7	69,2	71,6	73,8	77,5	80,9	85,5	88,4	79	90,9
Scanalatrice elettrica	85	88,7	89,8	90	92,9	94,1	94,2	93,4	88,9	79,8	100,2
Scanalatrice elettrica a denti	76,9	91,5	98	95,2	91,6	94,3	89,4	79	72,5	63,5	97,2
Scanalatrice elettrica a denti	79,6	88,1	87,9	88,9	91,2	93,1	94,7	85	78	66,5	98,5
Scanalatura manuale	88,7	100,6	95,1	93,2	91,4	89,7	86,1	82	72,5	65,9	94,4
Scavo con martello insonorizzato	91,5	102,7	104,2	101,9	94,6	86,2	84	86,1	89	84,7	97,9
Scrostatatura con martello elettrico Hilti	87,2	81,5	84,4	95,6	95,5	89,2	88,8	80,5	74,7	67,1	96,2
Sega circolare	71,9	72,2	69,3	74,8	82,8	82	92	87,2	82,6	66,6	95
Sega circolare	68,9	77,1	74,8	79,2	83,7	87,3	92,2	94,1	92,8	89,2	98,9
Sega circolare	63,1	70	69,8	78,3	84	89,9	87,7	80	79,3	67,5	93,2
Sostituzione binari e scambi	104	92,2	92,4	84,7	86,8	93,6	91,8	85,6	82,3	83,1	97,2
Spicconatura cls	80,8	97,1	100,8	101,1	97,9	90,3	92,3	84,5	91,1	74,7	99,9
Spicconatura facciate	79,2	85,3	86,3	87,1	91,7	92,8	94,1	94,1	88,8	75,2	99,9
Tagliapiastrelle Mefran K300	63,6	66	84,8	69,8	79,4	85,9	88	89,5	87,9	84,7	94,7
Tagliasfalto	77,6	95,7	87,8	83,3	85,1	85,9	85,4	84,5	83,7	74,7	92
Tagliasfalto a disco	87,2	94,6	93,2	87,9	89,2	86,5	85,7	85,4	79	63,2	93
Tagliasfalto a disco	96,6	104	102,6	97,3	98,6	95,9	95,1	94,8	88,4	72,6	102,4
Tagliasfalto a disco Fast Verdi	92,8	102,5	102,1	106,2	105,1	102,1	98	96,5	90,8	75	107,2
Tagliasfalto a disco Fast Verdi	88,9	81	90,3	97,4	99,7	95,1	92,3	93,9	93	85,3	101,9
Tagliasfalto a disco Fast Verdi	103,5	94	97,9	104,5	102,7	97,7	96,4	97,1	92,7	87	105,2
Tagliasfalto a martello	90,5	95,2	93,2	91,6	93,7	93,3	93,9	85,8	76,9	63,1	98,6
Tagliasfalto a martello	80,1	98,2	92,2	87,2	89,8	89,4	89,7	88,9	86,8	80,3	96,1
Tagliasfalto a martello	82,7	80,2	82,6	87,3	85,4	87,3	85,8	86	82	74,2	92,8
Tagliasfalto a martello	83	80,5	82,9	87,6	85,7	87,6	86,1	86,3	82,3	74,5	93,1
Taglio asette con flex Black e D. SA3628	67,1	69,9	67,2	69,9	81,2	90,7	91,7	90,3	92,3	89,1	97,8
Taglio con flessibile	84,8	91	93,3	95,7	98	102,2	101,9	92,6	90,3	81,9	106,4
Taglio con flex e posa pavimenti in pietra	65,6	70,8	71,1	74,9	81,9	88,7	91,4	91,6	92,6	88,9	97,8

Taglio con flex e posa piastrelle con battitura	59,7	64,9	65,2	69	76	82,8	85,5	85,7	86,7	83	91,9
Taglio con motosega e chiodatura listelli	58,6	59,5	70,3	80,3	85,6	85,5	87,8	80,6	76	66,3	91,8
Taglio con motosega e chiodatura tavole	96,4	87,3	85,1	85,2	86	86,2	84	84	84,3	84,2	92
Taglio tavellone armato con flessibile	74,4	76	78,8	103,6	97,4	101	95,6	88,4	83,7	72,1	103,9
Taglio tavole con circolare	101,6	91,8	88,4	87	87	87,3	90,2	88,9	89,7	88,3	96,1
Taglio tavole con motosega	101,3	91	92,5	90,3	89,6	87,8	88,9	88,3	88,5	87,2	95,7
Taglio tavole con sega circolare	95,1	85,8	81,5	81,4	82,3	86,2	94,9	92,6	91,3	85	99
Tosaerba Flyno MW100	70,1	95,7	89,9	89,3	88,3	86,2	84,6	73,8	64,5	63,2	91,2
Tosaerba Flyno MW100S	69,7	95,9	91,2	92,6	88,6	86,8	84,4	71,4	66,7	60,7	91,8
Tosaerba Titan professionale 90	88,8	99,7	97,4	96,3	94	89,4	88,2	77,8	72,8	66,6	95,8
Trapano per fori centro volta	70,2	75,3	75,5	75,4	84,7	91,2	87,7	79,9	75,7	67,4	93,8

Tabella 17: Valori degli spettri e della rumorosità globale per alcune macchine operatrici

Nel valutare la pericolosità delle sorgenti si tenga presente che, per quanto detto sull'acustica fisiologica, a causa della minor sensibilità dell'orecchio umano medio alle basse frequenze e alle alte, risultano più pericolose le rumorosità aventi spettri con livelli maggiori nella zona centrale della banda uditiva, cioè fra 1000 e 4000 Hz. Quest'aspetto va tenuto in conto anche nel selezionare le protezioni uditive. Si riporta, a tal proposito, quanto previsto dalla direttiva macchine.

#### 7.14.2. VALORI DI RIFERIMENTO DELL'ISTITUTO DI FISICA TECNICA DI CATANIA

Nel 1998-99 è stata svolta dall'ex Istituto di Fisica Tecnica della Facoltà di Ingegneria di Catania (ora *Dipartimento di Ingegneria Industriale e Meccanica*) una campagna di misure su macchine da cantiere in Sicilia.

L'indagine aveva lo scopo di misurare gli effettivi livelli personali di esposizione in cantieri esistenti operanti con macchine operatrici nuove ed usate. Per alcune situazioni si è adoperato il codice *Raynoise*® per il quale, oltre alla modellazione geometrica dei siti, si sono utilizzati dati relativi ai livelli di potenza delle macchine affidabili e realistici.



Figura 98: Modalità di misura dei livelli di potenza

Qualora possibile è sempre opportuno rilevare le potenze delle macchine direttamente mediante misure ad  $1\text{ m}$  di distanza da esse e a  $1.6\text{ m}$  di altezza dal suolo. Risulta, in base a quanto già detto nell'*Acustica Fisica*:  $L_p = L_w - 20 \log d - 8\text{ (dB)}$

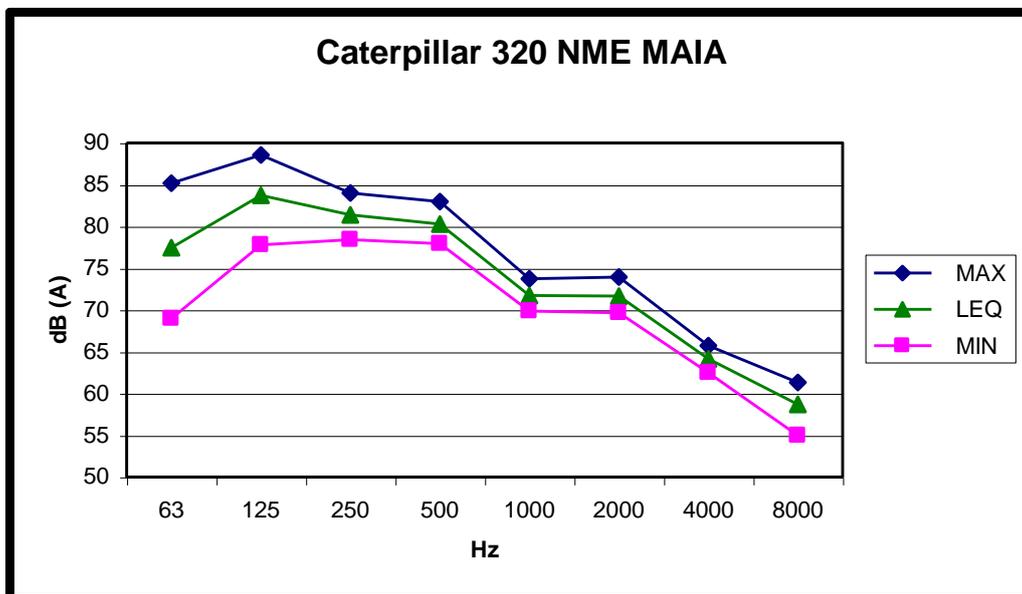
e quindi per  $d=1\text{ m}$  è:

$$L_w = L_p + 8\text{ (dB)}$$

Le misure sulle macchine di cantiere sono state effettuate in campo aperto, a distanza di un metro dalla sorgente e pesando le misure in scala "A". Per la misure è stato utilizzato il fonometro *real time Larson e Davis 2900*.

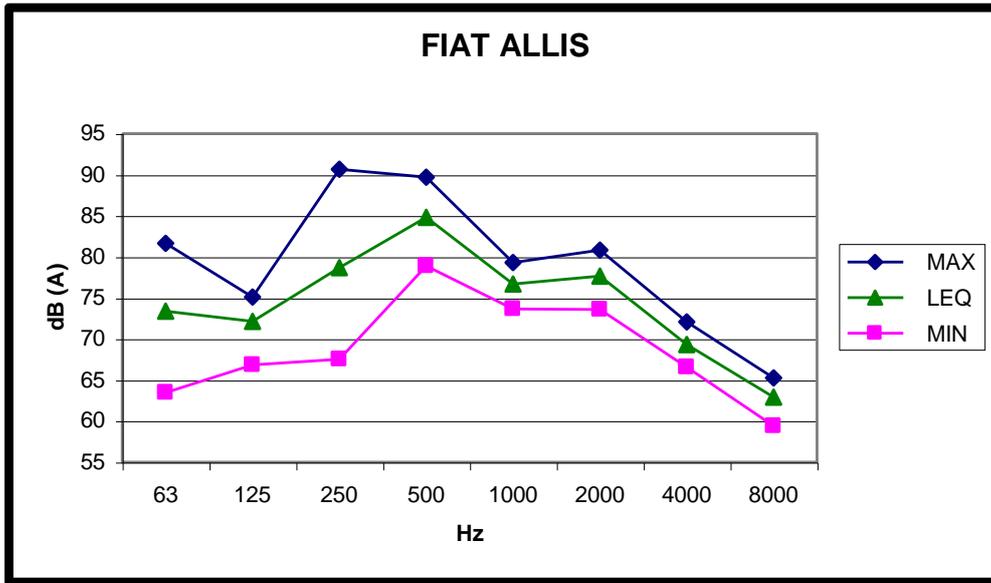
### Caterpillar 320 NME Maia

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	85,182	88,545	83,983	82,995	73,729	73,917	65,733	61,288
MIN	68,931	77,821	78,385	77,915	69,872	69,66	62,511	54,985
LEQ	77,421	83,7	81,372	80,243	71,73	71,683	64,11	58,701
Lw	85,421	91,7	89,372	88,243	79,73	79,683	72,11	66,701



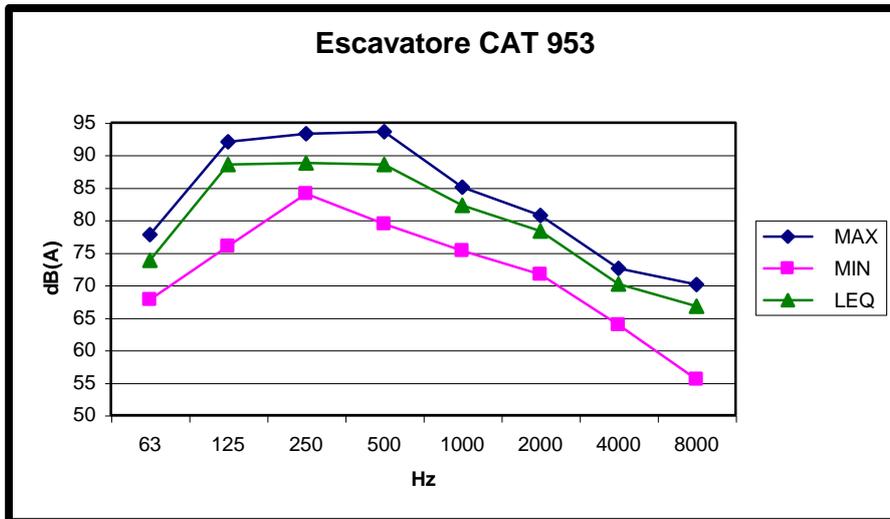
### Fiat Allis fl6

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	81,631	75,116	90,638	89,674	79,279	80,808	72,106	65,239
MIN	63,499	66,862	67,497	78,856	73,682	73,611	66,532	59,43
LEQ	73,353	72,177	78,715	84,829	76,692	77,633	69,354	62,887
LW	81,353	80,177	86,715	92,829	84,692	85,633	77,354	70,887



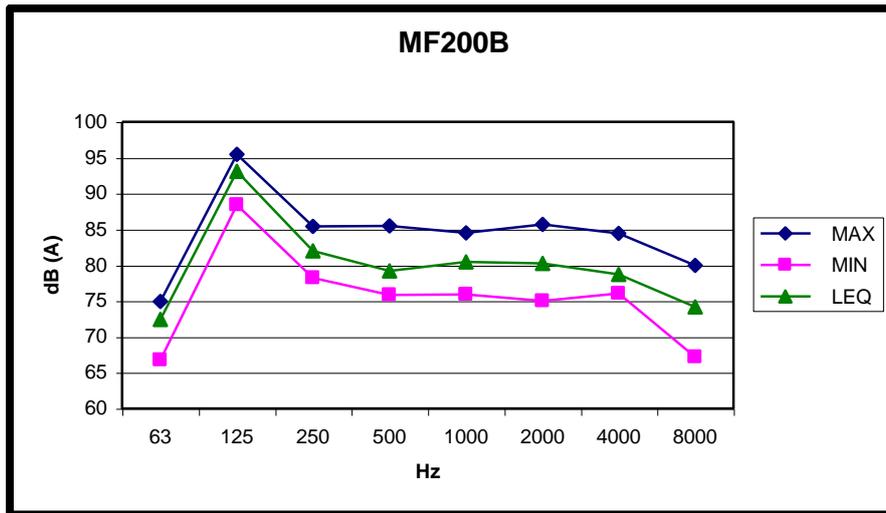
### Escavatore CAT 953

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	77,774	92,026	93,319	93,578	85,088	80,69	72,6	70,131
MIN	67,732	75,987	84,03	79,42	75,328	71,683	63,851	55,526
LEQ	73,799	88,569	88,827	88,545	82,266	78,315	70,154	66,72
Lw	81,799	96,569	96,827	96,545	90,266	86,315	78,154	74,72



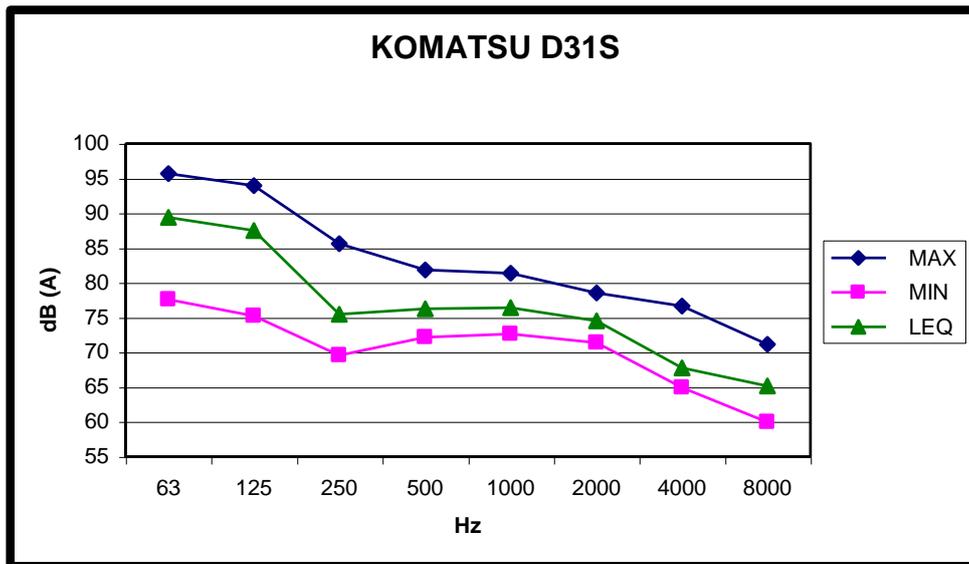
### Pala meccanica MF200B

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	74,952	95,436	85,417	85,464	84,477	85,699	84,43	79,938
MIN	66,744	88,428	78,197	75,822	75,916	75,022	76,081	67,214
LEQ	72,412	93,108	81,96	79,185	80,455	80,22	78,715	74,176
Lw	80,412	101,11	89,96	87,185	88,455	88,22	86,715	82,176



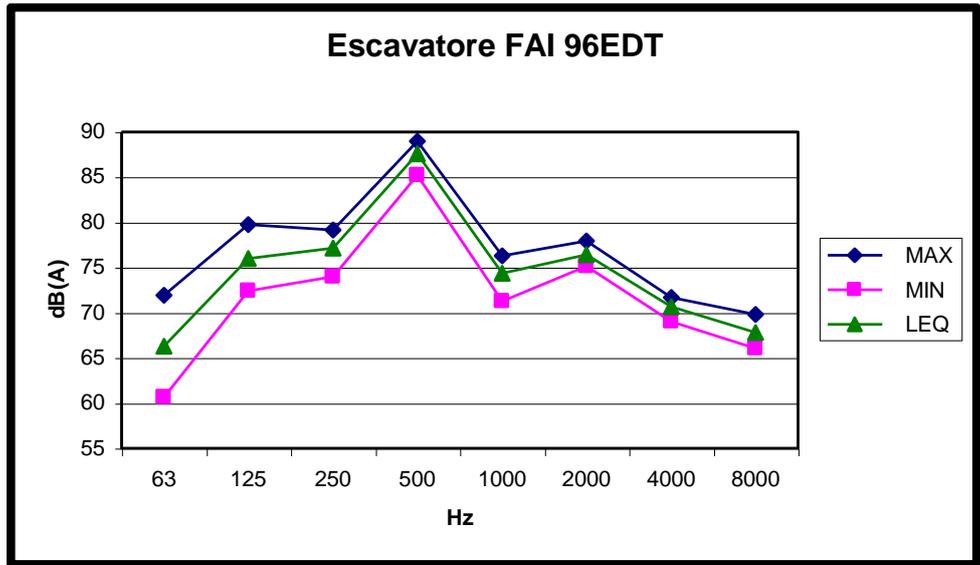
**Escavatore Komatsu d31s**

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	95,695	93,978	85,582	81,843	81,325	78,526	76,598	71,095
MIN	77,586	75,187	69,59	72,153	72,6	71,33	64,933	59,994
LEQ	89,368	87,51	75,469	76,269	76,433	74,505	67,779	65,145
Lw	97,368	95,51	83,469	84,269	84,433	82,505	75,779	73,145



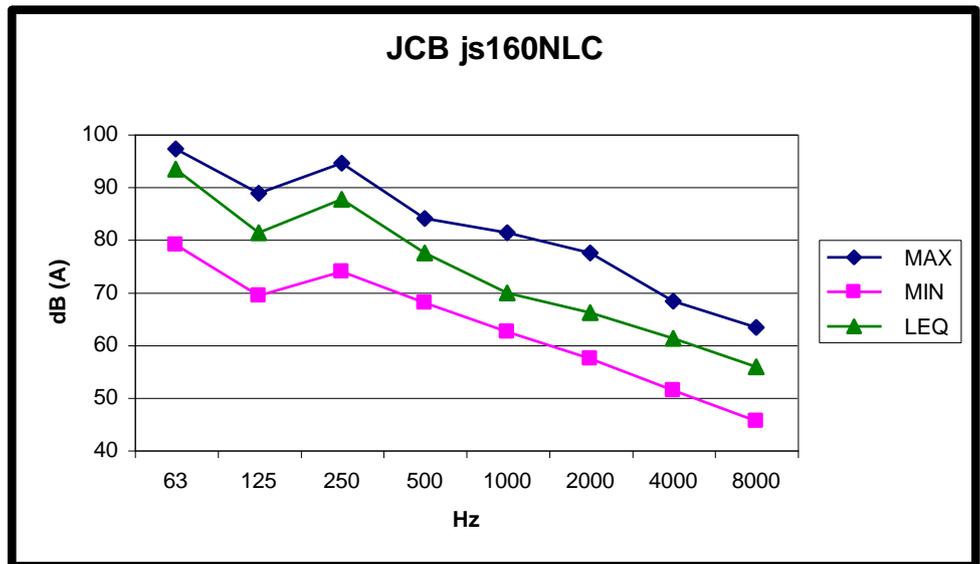
**Escavatore Fai 96edt**

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	71,894	79,726	79,161	88,992	76,316	77,915	71,683	69,801
MIN	60,653	72,388	73,964	85,229	71,283	75,116	69,025	66,015
LEQ	66,297	75,987	77,115	87,557	74,34	76,433	70,624	67,826
Lw	74,297	83,987	85,115	95,557	82,34	84,433	78,624	75,826



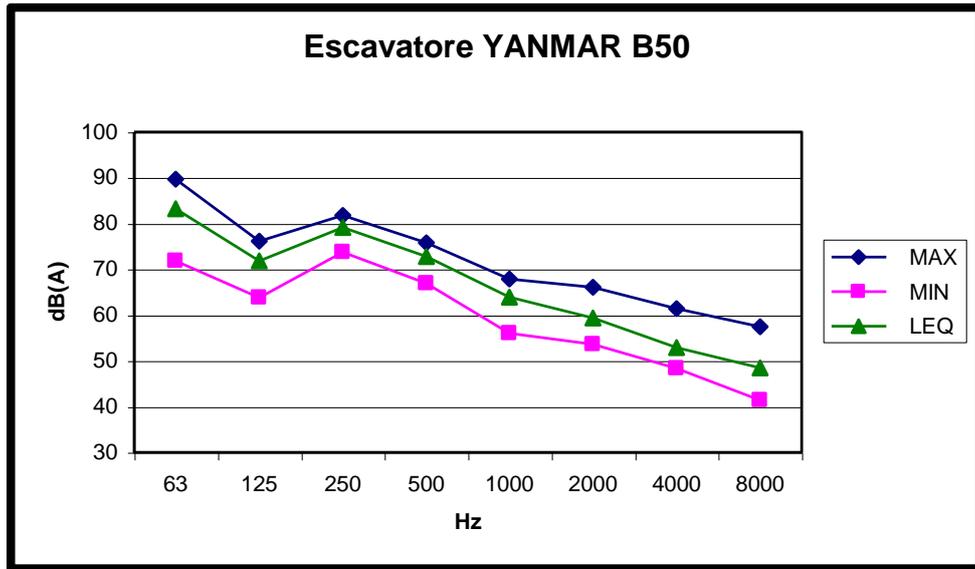
### Escavatore JCB JS 160 NLC

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	97,2	88,733	94,448	83,959	81,302	77,445	68,249	63,334
MIN	79,044	69,331	73,94	67,967	62,417	57,337	51,293	45,46
LEQ	93,343	81,325	87,581	77,445	69,872	66,109	61,217	55,855
Lw	101,34	89,325	95,581	85,445	77,872	74,109	69,217	63,855



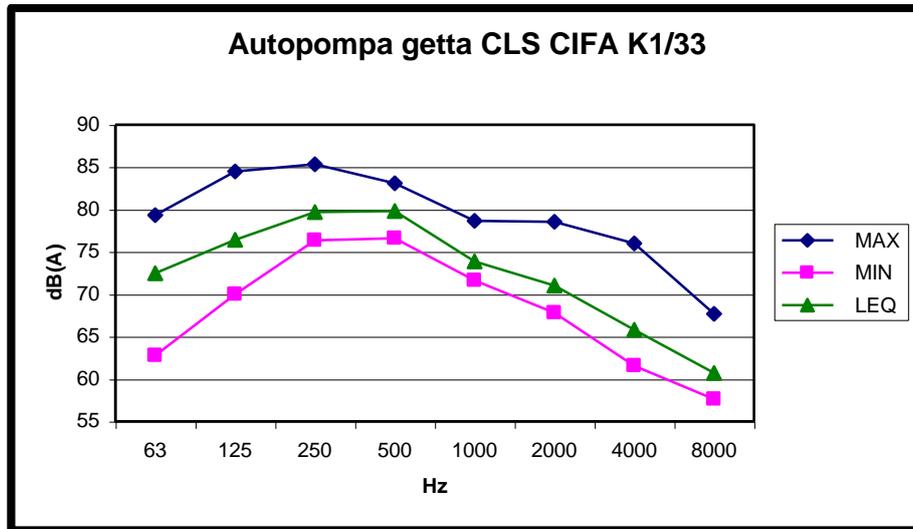
### Escavatore Yanmar B50

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	89,721	76,151	81,748	75,845	67,92	66,133	61,452	57,501
MIN	71,777	63,804	73,799	66,862	55,996	53,574	48,282	41,392
LEQ	83,183	71,847	79,138	72,765	63,945	59,383	52,868	48,423
Lw	91,183	79,847	87,138	80,765	71,945	67,383	60,868	56,423



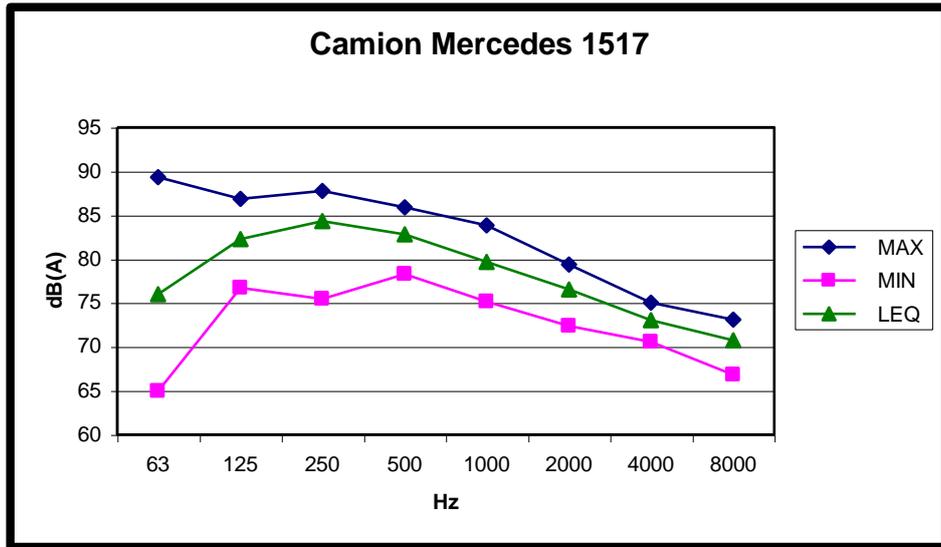
**Cifa**

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	79,326	84,453	85,3	83,065	78,644	78,526	75,987	67,661
MIN	62,793	69,989	76,363	76,575	71,612	67,826	61,57	57,619
LEQ	72,459	76,386	79,679	79,82	73,893	71,001	65,827	60,676
Lw	80,459	84,386	87,679	87,82	81,893	79,001	73,827	68,676



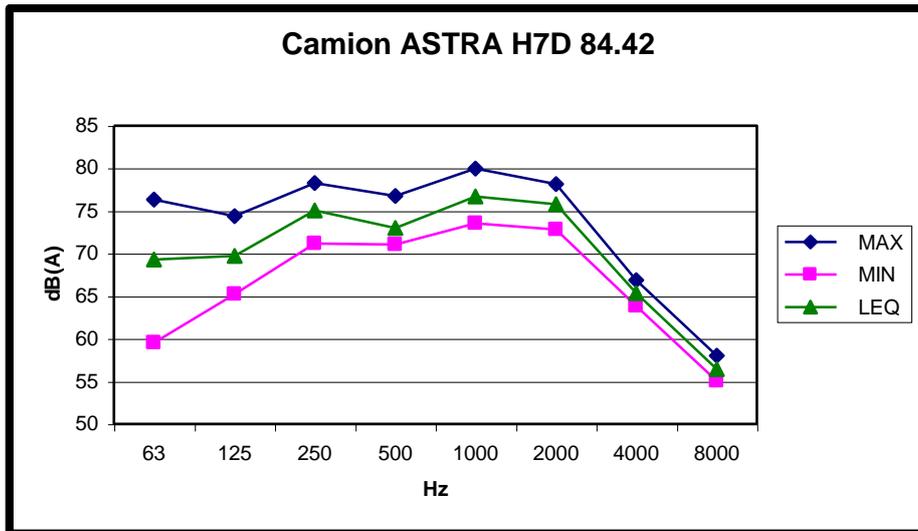
**Camion Mercedes 1517**

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	89,298	86,852	87,769	85,864	83,818	79,373	75,046	73,117
MIN	64,933	76,692	75,469	78,268	75,163	72,388	70,577	66,815
LEQ	75,963	82,242	84,335	82,783	79,655	76,551	73,047	70,742
Lw	83,963	90,242	92,335	90,783	87,655	84,551	81,047	78,742



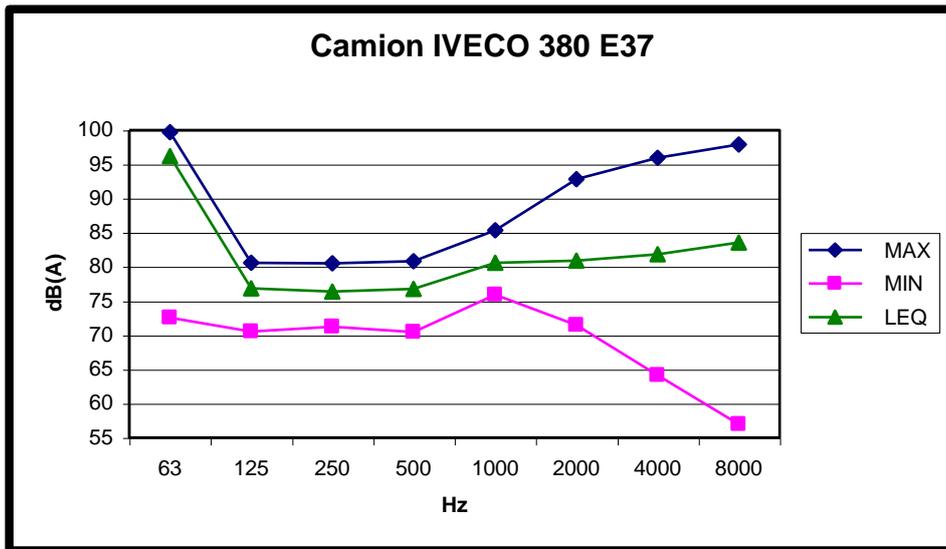
**Camion Astra H7d 84.42**

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	76,339	74,364	78,291	76,739	79,961	78,174	66,885	57,995
MIN	59,547	65,215	71,189	71,071	73,541	72,812	63,851	55,009
LEQ	69,284	69,707	75,022	73	76,669	75,775	65,356	56,42
Lw	77,284	77,707	83,022	81	84,669	83,775	73,356	64,42



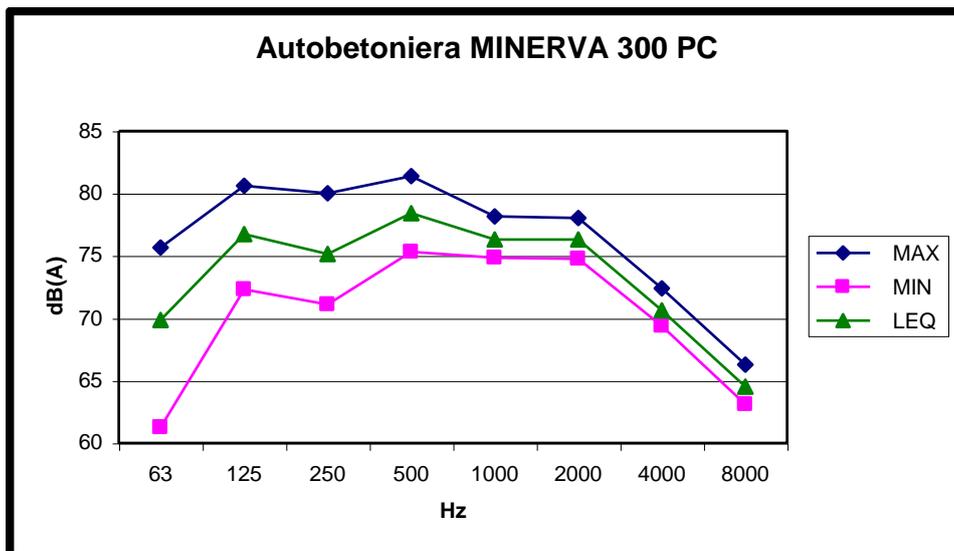
**Camion Iveco 380 E37**

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	99,693	80,573	80,478	80,831	85,37	92,825	95,93	97,905
MIN	72,553	70,483	71,189	70,436	75,916	71,424	64,11	56,937
LEQ	96,165	76,857	76,339	76,786	80,549	80,925	81,843	83,583
Lw	104,16	84,857	84,339	84,786	88,549	88,925	89,843	91,583



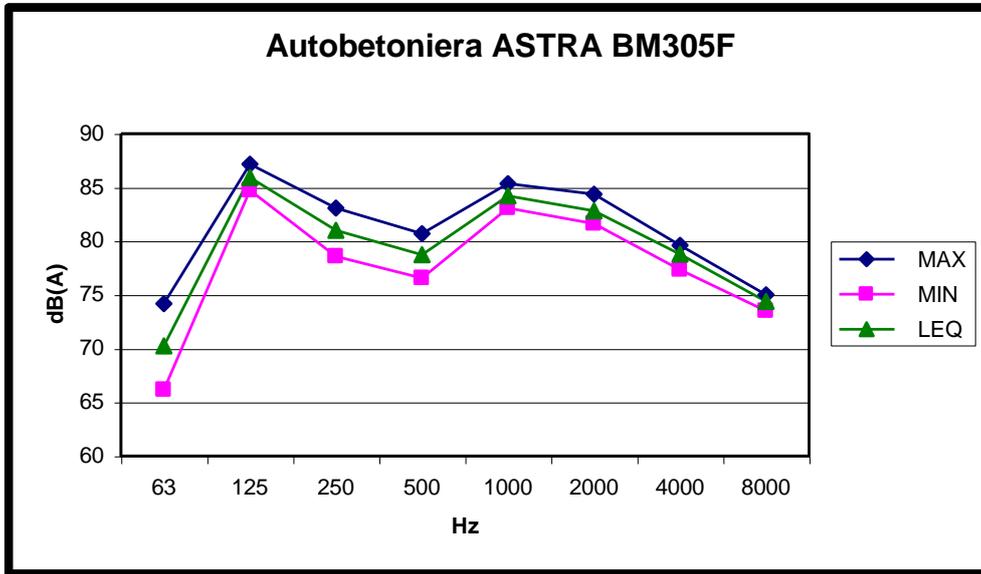
### Autobetoniera Minerva 300 PC

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	75,657	80,62	80,008	81,372	78,15	78,009	72,388	66,297
MIN	61,241	72,318	71,095	75,305	74,858	74,74	69,378	63,099
LEQ	69,848	76,739	75,14	78,432	76,292	76,292	70,648	64,51
Lw	77,848	84,739	83,14	86,432	84,292	84,292	78,648	72,51



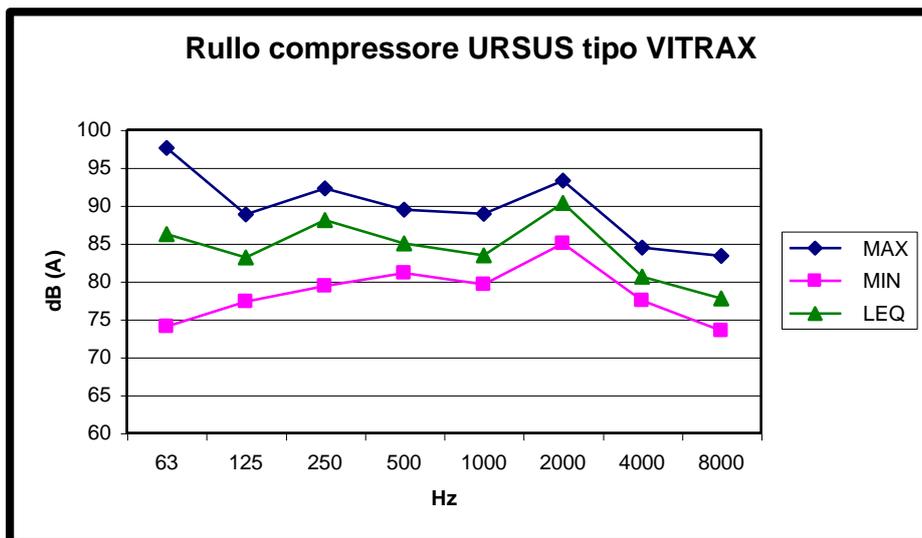
**Autobetoniera Astra BM305F**

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	74,176	87,134	83,065	80,69	85,37	84,382	79,585	75,022
MIN	66,156	84,735	78,574	76,551	83,065	81,631	77,351	73,517
LEQ	70,225	85,935	81,019	78,738	84,194	82,807	78,762	74,387
Lw	78,225	93,935	89,019	86,738	92,194	90,807	86,762	82,387



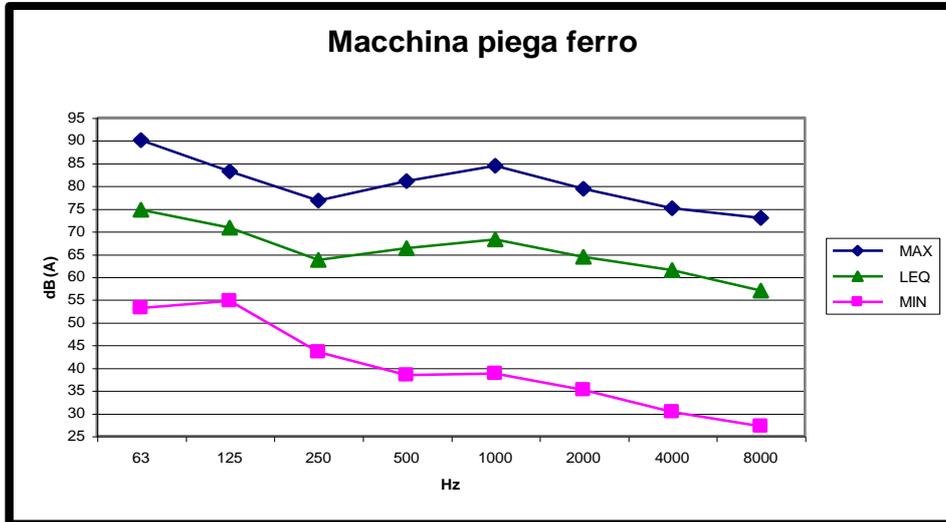
**Rullo compressore Ursus Vitrax**

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	97,6	88,851	92,285	89,462	88,898	93,272	84,477	83,324
MIN	74,011	77,304	79,397	81,066	79,585	85,017	77,492	73,517
LEQ	86,264	83,183	88,098	84,97	83,395	90,333	80,62	77,75
Lw	94,264	91,183	96,098	92,97	91,395	98,333	88,62	85,75



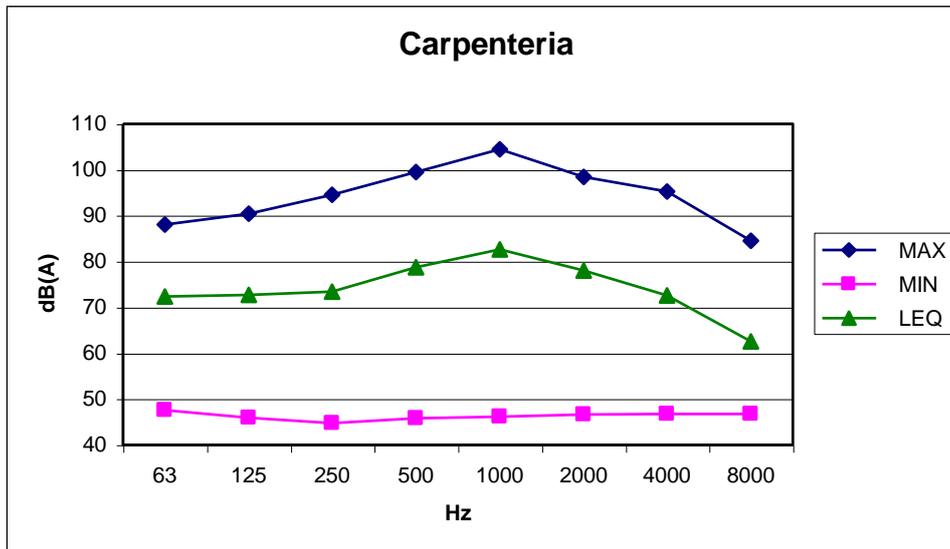
### Macchina piegaferro

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	90,097	83,16	76,786	81,043	84,406	79,373	75,093	72,929
MIN	53,127	54,726	43,414	38,405	38,781	35,089	30,315	27,116
LEQ	74,717	70,766	63,663	66,344	68,202	64,439	61,476	56,984
LW	82,717	78,766	71,663	74,344	76,202	72,439	69,476	64,984



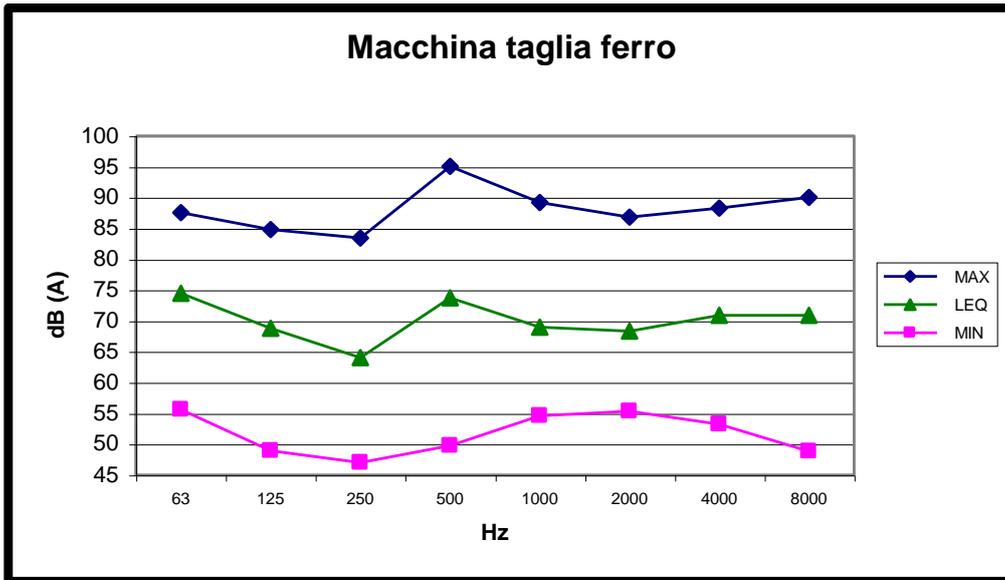
### Lavori di carpenteria

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	88,098	90,356	94,589	99,457	104,47	98,446	95,271	84,477
MIN	47,6	45,954	44,684	45,742	46,189	46,613	46,73	46,777
LEQ	72,341	72,718	73,4	78,762	82,642	78,033	72,6	62,581
Lw	80,341	80,718	81,4	86,762	90,642	86,033	80,6	70,581



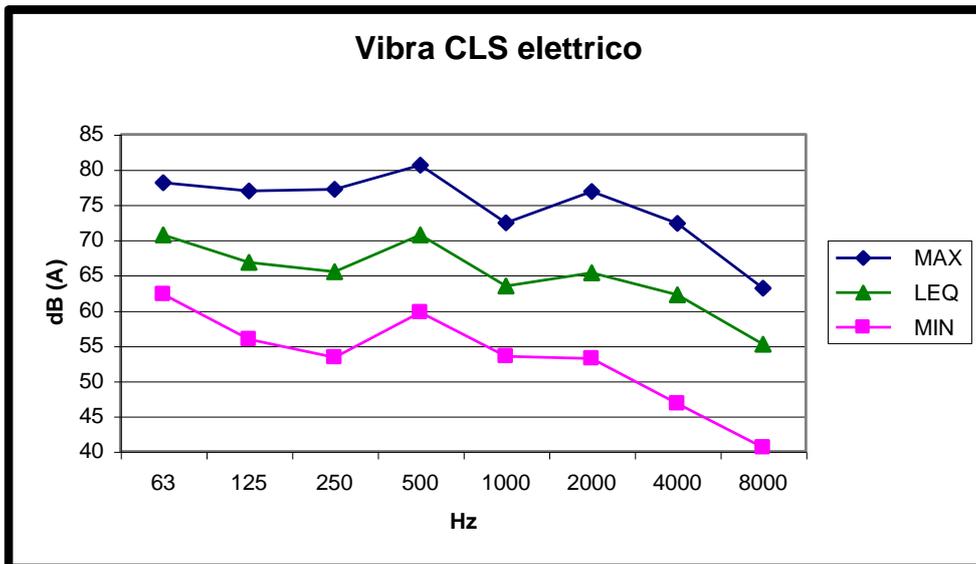
### Macchina tagliaferro

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	87,557	84,806	83,465	95,083	89,227	86,852	88,263	90,05
MIN	55,644	48,894	46,989	49,741	54,632	55,385	53,245	48,823
LEQ	74,481	68,79	64,063	73,776	68,955	68,343	70,883	70,907
LW	82,481	76,79	72,063	81,776	76,955	76,343	78,883	78,907



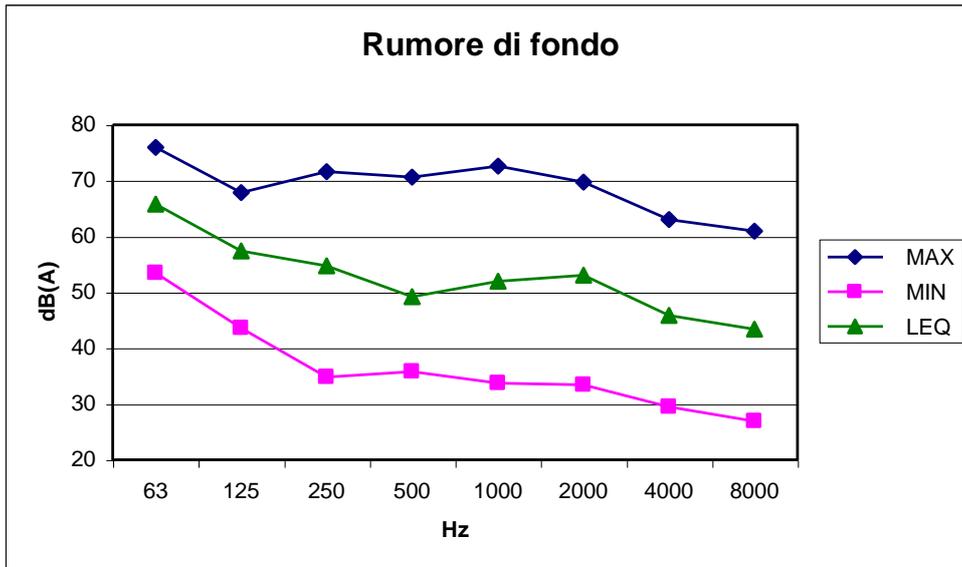
### Vibra cls elettrico

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	78,127	76,951	77,209	80,667	72,459	76,927	72,341	63,169
MIN	62,276	55,879	53,315	59,736	53,48	53,174	46,754	40,545
LEQ	70,719	66,838	65,521	70,742	63,451	65,356	62,205	55,244
LW	78,719	74,838	73,521	78,742	71,451	73,356	70,205	63,244



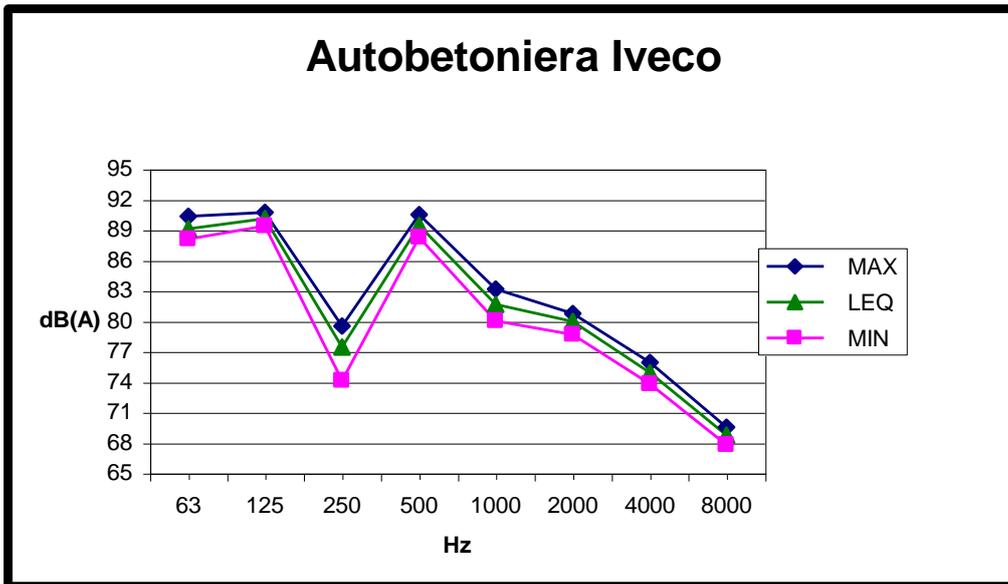
### Rumore ambientale

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	75,963	67,896	71,612	70,671	72,647	69,731	62,981	60,935
MIN	53,456	43,579	34,83	35,794	33,748	33,466	29,444	26,952
LEQ	65,756	57,431	54,726	49,223	51,998	53,104	45,884	43,367
Lw	73,756	65,431	62,726	57,223	59,998	61,104	53,884	51,367



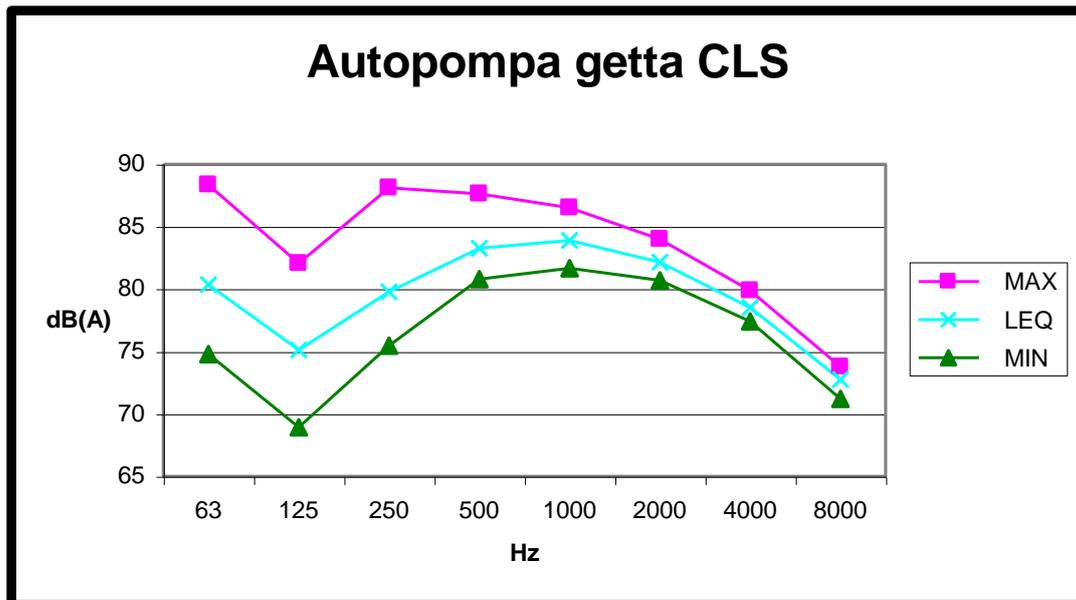
### Autobetoniera Iveco

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	90,356	90,732	79,514	90,497	83,183	80,761	75,916	69,519
MIN	88,098	89,392	74,152	88,263	80,032	78,668	73,799	67,802
LEQ	89,086	90,121	77,445	89,462	81,631	79,985	74,905	68,767
LW	97,086	98,121	85,445	97,462	89,631	87,985	82,905	76,767



### Autopompa getta cls

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
MAX	88,333	82,031	88,098	87,628	86,523	84,006	79,891	73,752
MIN	74,787	68,931	75,446	80,808	81,654	80,714	77,398	71,212
LEQ	80,337	75,116	79,773	83,277	83,889	82,148	78,503	72,741
LW	88,337	83,116	87,773	91,277	91,889	90,148	86,503	80,741



### 7.14.3. DIRETTIVA 2003/10/CE DEL 06/02/03

Nella *Gazzetta Ufficiale* n. 42/L dell'Unione Europea è stata pubblicata la Direttiva 2003/10/CE del Parlamento europeo e del Consiglio sulle prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (rumore).

La direttiva stabilisce prescrizioni minime di protezione dei lavoratori contro i rischi per la loro salute e sicurezza che derivano, o possono derivare, dall'esposizione al rumore e, segnatamente, contro il rischio per l'udito.

I nuovi limiti di esposizione e i valori di esposizione che faranno scattare l'azione a livello di esposizione giornaliera al rumore e alla pressione acustica di picco sono:

#### Valori limite di esposizione:

$L_{EX,8h} = 87 \text{ dB(A)}$  e  $p_{peak} = 200 \text{ Pa}$  rispettivamente;

Valori superiori di esposizione che fanno scattare l'azione:

$L_{EX,8h} = 85 \text{ dB(A)}$  e  $p_{peak} = 140 \text{ Pa}$  rispettivamente;

Valori inferiori di esposizione che fanno scattare l'azione:

$L_{EX,8h} = 80 \text{ dB(A)}$  e  $p_{peak} = 112 \text{ Pa}$  rispettivamente;

In particolari circostanze, per le attività in cui l'esposizione giornaliera al rumore varia significativamente, il livello di esposizione giornaliero al rumore potrà essere sostituito dal livello di esposizione settimanale. Questo potrà avvenire a condizione che: il livello di esposizione settimanale al rumore, come dimostrato da un controllo idoneo, non ecceda il valore limite di esposizione di 87 dB(A); e siano adottate adeguate misure per ridurre al minimo i rischi associati a tali attività. Attualmente, secondo il quanto stabilito dal Decreto Legislativo 227/91 descritto in precedenza, vengono superati i valori limite quando l'esposizione quotidiana personale di un lavoratore al rumore risulta superiore a **90 dBA** od il valore della pressione acustica istantanea non ponderata risulta superiore a **140 dB** (200Pa).

E' presumibile che diversi datori di lavoro, per rientrare nei nuovi limiti, se consideriamo che la differenza di 3 dB tra due fenomeni sonori significa che uno è il doppio dell'altro, dovranno adottare nuove misure tecniche, organizzative e procedurali.

Gli Stati membri dovranno conformarsi alla direttiva entro il 15 febbraio 2006.

## 8. L. 447 DEL 26/10/95: LEGGE QUADRO SUL RUMORE

La L. 447/95 è la prima vera Legge sul rumore. E' denominata "**Legge Quadro**" perché detta solamente i riferimenti legislativi per lo Stato, le Regioni, le province e i Comuni. Completano questa Legge una serie di decreti legislativi emessi negli anni successivi.

### 8.1. LA LEGGE QUADRO 447/95

Questa legge stabilisce i principi fondamentali in materia di tutela dell'ambiente esterno e dell'ambiente abitativo dall'inquinamento acustico.

Dopo avere stabilito alcune definizioni fondamentali questa Legge definisce le competenze per:

- lo Stato
- per le Regioni
- per le Province
- per i Comuni.

Non sono delineate normative tecniche specifiche ma si rimanda a leggi e decreti che dovranno emettere le regioni, le province e i comuni in uno alle competenze generali dello Stato.

Saranno le regioni a dovere emanare norme tecniche per la zonizzazione acustica del territorio che dovrà poi essere attuata dai comuni. E' questo uno dei passi fondamentali per l'avvio del processo applicativo della Legge.

La Legge prevede all'art. 7 piani di risanamento acustico che dovranno essere approvati dal consiglio comunale. Questi debbono contenere l'individuazione delle sorgenti acustiche, dei soggetti cui compete l'intervento, le priorità del risanamento, la stima degli oneri finanziari, le misure cautelari per la tutela dell'ambiente. Nei comuni con popolazione superiore ai 50.000 abitanti il consiglio comunale presenta una relazione biennale sullo stato acustico del comune.

## 8.2. DISPOSIZIONI IN MATERIA DI INQUINAMENTO ACUSTICO

La Legge 477/95 prevede che i progetti sottoposti a valutazione di impatto ambientale siano redatti in conformità alle esigenze di tutela dall'inquinamento acustico delle popolazioni interessate.

Sono previste relazioni specifiche di impatto acustico per le seguenti opere: aeroporti, eliporti, autostrade, strade extraurbane principali, strade urbane di scorrimento, strade urbane di quartiere, strade locali, discoteche, circoli ove siano installati macchinari o impianti rumorosi, impianti sportivi e ricreativi, ferrovie.

Occorre produrre una valutazione previsionale del clima acustico delle aree interessate alla realizzazione delle seguenti tipologie di insediamenti:

- scuole ed asili nido;
- ospedali;
- casa di cura e di riposo;
- parchi pubblici privati ed extraurbani;
- nuovi insediamenti residenziali.

Le domande di concessione edilizia per nuovi impianti ed infrastrutture adibiti ad attività produttive, sportive e ricreative, postazioni di servizi commerciali e polifunzionali debbono contenere una documentazione di impatto acustico.

Le attività che si prevede possano produrre valori di emissioni superiori ai limiti di legge debbono presentare una relazione alle competenti autorità comunali ove siano descritte le misure per ridurre ed eliminare le emissioni rumorose causate dalle stesse attività e dagli impianti.

## 8.3. IMPLICAZIONI SULLA SICUREZZA NEI LUOGHI DI LAVORO

La *Legge Quadro sul Rumore* n. 477/95 può certamente influenzare i piani della sicurezza non appena avrà espresso tutta la sua efficacia. In particolare le Regioni stanno per emanare, alcune lo hanno già fatto, norme per la zonizzazione comunale.

I comuni potranno così zonizzare e pertanto i limiti di rumorosità esterna saranno quelli riportati nella legge, cioè:

<i>Zonizzazione</i>	<i>Limite diurno</i>	<i>Limite notturno</i>
<i>I) Aree particolarmente protette</i>	50	40
<i>II) Aree prevalentemente residenziali</i>	55	45
<i>III) Aree di tipo misto</i>	60	50
<i>IV) Aree di intensa attività umana</i>	65	55
<i>V) Aree prevalentemente industriali</i>	70	60
<i>VI) Aree esclusivamente industriali</i>	70	70

I responsabili della sicurezza dovranno, quindi, assicurare non solo le condizioni di dose di esposizione quotidiana indicate dal D.Lgs 277/91 ma anche rispettare i limiti di rumorosità esterna per le abitazioni, le strade e gli spazi comuni vicini al cantiere in conformità alla succitata tabella.

Non sarà facile rispettare questi limiti soprattutto nelle zone urbane protette e residenziali. Ciò implicherà l'utilizzo di barriere acustiche mobili al confine dell'area di cantiere, la previsione della rumorosità esterna (ad esempio con codici di calcolo) e l'aggiornamento delle protezioni ogni qual volta il cantiere subisce una modificazione.

## 9. CRITERI DI VALUTAZIONE DEL RUMORE

La soggettività del rumore rende complessa la sua valutazione e la sua misura. Per questo motivo sono stati introdotti vari criteri che prendono in considerazione solamente alcuni aspetti particolari, quale, ad esempio, l'interferenza del rumore sul linguaggio parlato. Questi criteri risultano utili anche per la progettazione impiantistica poiché forniscono un riferimento numerico ben preciso.

Essendo il rumore un fenomeno complesso la cui stessa definizione risulta difficile a causa del giudizio soggettivo di disturbo dato dall'uomo ne consegue che non è possibile ottenere una scala di misura univoca ma occorre di volta in volta *valutare* il rumore in funzione dell'attività svolta dal soggetto ascoltatore.

### 9.1. LE CURVE NOISE CRITERIA (NC)

Per valutare il disturbo prodotto da un rumore all'interno di edifici si può utilizzare il Criterio delle curve NC. Si traccia sopra le curve lo spettro del rumore rilevato a bande d'ottava e si determina la curva che involupa esternamente tale spettro.

Il valore di questa curva (eventualmente interpolato fra quelle indicati nell'abaco) indica il valore dell'indice NC (vedi Figura 99). Esso è correlato al disturbo che il rumore produce nel linguaggio parlato. Viene penalizzata la banda più energetica.

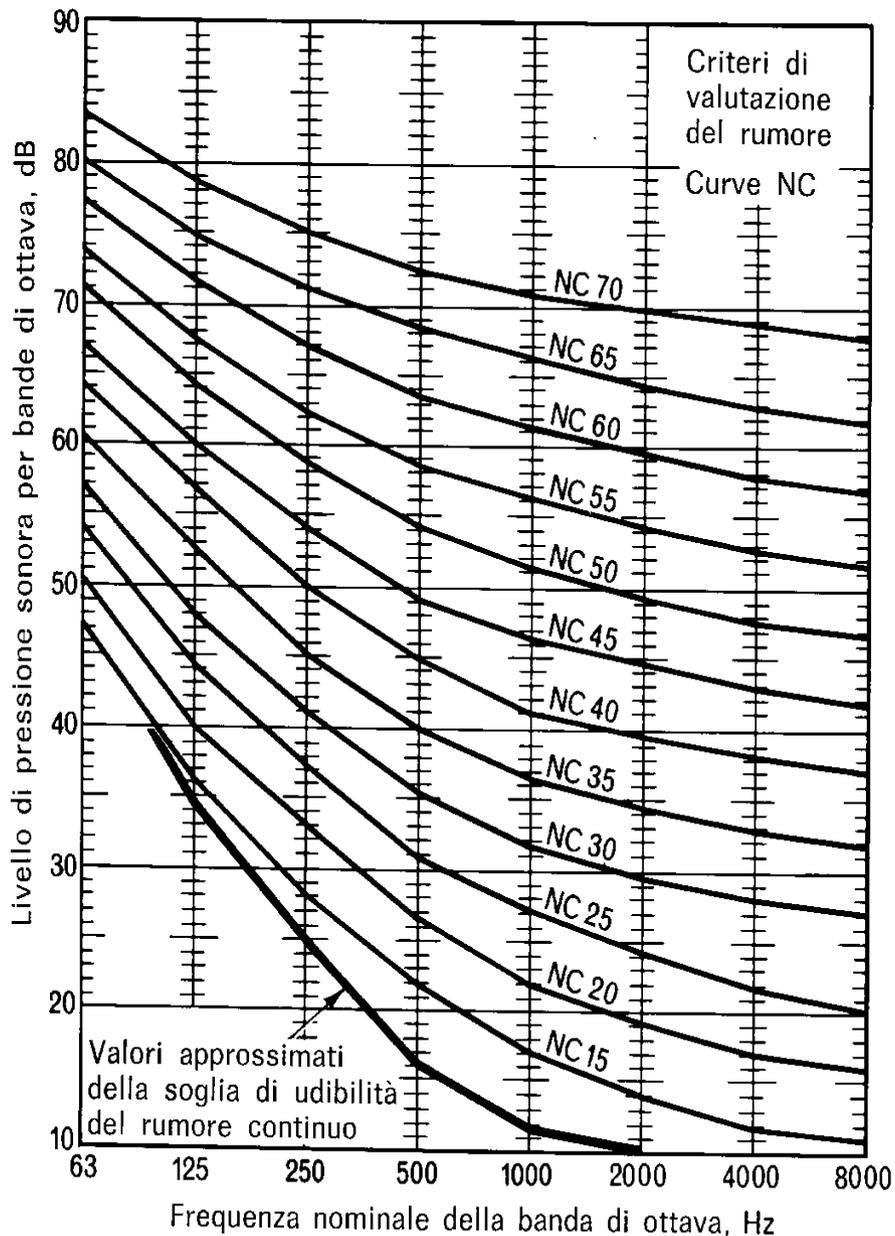


Figura 99: Curve NC per la valutazione del rumore.

## 9.2. LE CURVE NOISE RATING (NR)

Più recentemente sono state proposte in Europa ed accettate dalla ISO le curve NR, (vedi Figura 100), in sostituzione delle curve NC (di origine USA).

Il loro utilizzo é del tutto simile alle NC.

## 9.3. VALORI DI RIFERIMENTO NC ED NR

I valori di riferimento relativi alle curve NC ed NR sono riportati nella seguente Tabella 18 in funzione della destinazione d'uso dei locali nei quali valutare le prestazioni acustiche.

### 9.4. NORMA ISO -R 1996 - COMPOSITE NOISE RATING

Per la valutazione della rumorosità interna si può applicare il criterio CNR indicato dalla Norma ISO -R 1996, così come indicato nella seguente Tabella 19. In pratica si sceglie un criterio base per la valutazione che si desidera effettuare.

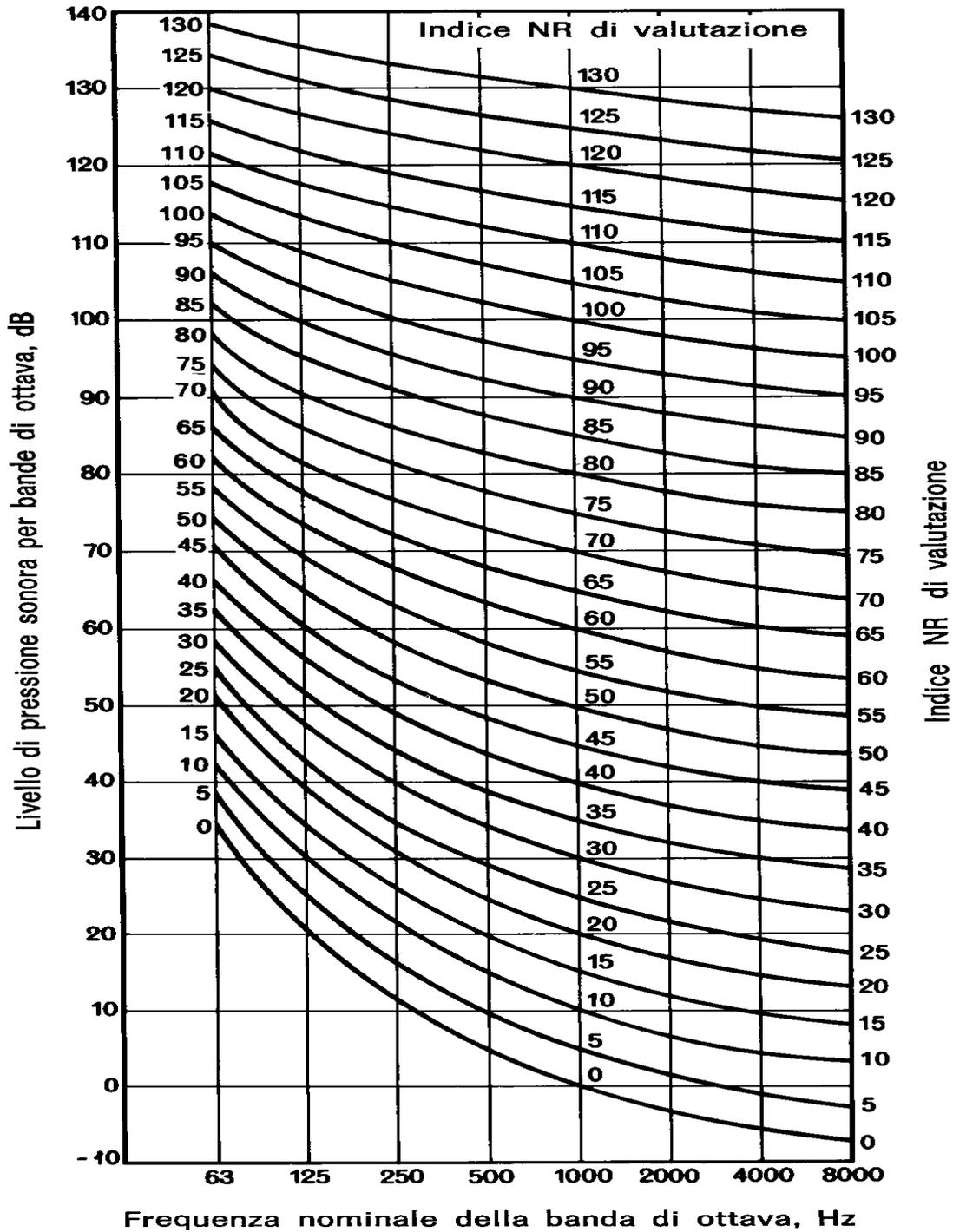


Figura 100: Curve di valutazione NR

**TABELLA 2.3**  
**Livelli NC raccomandati in vari tipi di ambiente**

<i>Ambiente</i>	<i>Gamma di livelli di probabile tollerabilità</i>
Fabbriche (industria pesante)	NC 55 ÷ 75
Fabbriche (industria leggera)	NC 45 ÷ 65
Cucine	NC 40 ÷ 50
Piscine ed aree sportive	NC 35 ÷ 50
Grandi magazzini e negozi	NC 35 ÷ 45
Ristoranti, bar, mense	NC 35 ÷ 45
Uffici meccanizzati	NC 40 ÷ 50
Uffici in genere	NC 35 ÷ 45
Uffici privati, biblioteche, aule d'udienza, aule scolastiche	NC 30 ÷ 35
Case private, camere da letto	NC 25 ÷ 35
Corsie d'ospedale, sale operatorie	NC 25 ÷ 35
Cinematografi	NC 30 ÷ 35
Teatri, sale da riunione, chiese	NC 25 ÷ 30
Sale da concerto, teatri d'opera	NC 20 ÷ 25
Studi di registrazione e di trasmissione	NC 15 ÷ 20

**TABELLA 2.4**  
**Livelli NR raccomandati in vari tipi di ambiente**

Officine	NR 60 ÷ 70
Uffici meccanizzati	NR 50 ÷ 55
Palestre, piscine	NR 40 ÷ 50
Ristoranti, bar, mense	NR 35 ÷ 45
Uffici privati, biblioteche, aule d'udienza	NR 30 ÷ 40
Cinematografi, ospedali, chiese, piccole sale da conferenza	NR 25 ÷ 35
Aule scolastiche, studi televisivi, grandi sale da conferenza	NR 20 ÷ 30
Sale da concerto, teatri	NR 20 ÷ 25
Cliniche diagnostiche, cabine audiometriche	NR 10 ÷ 20

*Tabella 18: Valori di riferimento NC ed NR*

Al valore di base NR si applicano poi una serie di correzioni (*composite*), prese ciascuna con il proprio segno, che tengono conto del luogo, delle attività, della durata temporale, etc., come indicato nella tabella. Il valore così corretto di NR viene detto CNR.

Occorre quindi effettuare il confronto fra il valore CNR calcolato e valore NR del rumore da valutare.

Se la differenza è inferiore a 5 dB il rumore non disturba altrimenti si hanno disturbi non accettabili o reazioni comunitarie forti.

Si osservi come i criteri del livello differenziale massimo di 5 dB sua stato recepito dal DPCM 1/3/91 e dal DPCM 14/11/97.

TABELLA 2.6

**Sommario del metodo di previsione del disturbo arrecato alla comunità secondo le curve NR (da Kosten e Van Os)**

<i>Scelta del criterio</i>	
Criterio base per l'interno di camere da letto	NR 25
Criterio base per l'interno di locali di soggiorno	NR 30
<i>Correzione da sommarsi al numero NR di base</i>	
Presenza di toni puri o di altre caratteristiche tonali facilmente distinguibili	— 5
Rumore impulsivo e/o intermittente	— 5
Rumore presente solo durante le ore lavorative	+ 5
Rumore presente solo per il 25% del tempo	+ 5
6%	+ 10
1,5%	+ 15
0,5%	+ 20
0,1%	+ 25
0,02%	+ 30
Tipo di area: suburbana molto tranquilla	— 5
suburbana	0
urbana residenziale	+ 5
urbana in prossimità di qualche industria	+ 10
area industriale vera e propria	+ 15

Il criterio corretto si ottiene dalla somma del criterio base e delle appropriate correzioni.

*Valutazione*

Se lo spettro a bande d'ottava misurato supera, in una banda qualsiasi, la curva corrispondente al criterio NR corretto

- di meno di 5 dB, il rumore è giudicato marginale;
- di 5 ÷ 10 dB, il rumore è giudicato difficile da accettare;
- di più di 10 dB, il rumore è giudicato inaccettabile.

*Tabella 19: Applicazione del metodo ISO R 1996*

## 10. DPCM 14-11-97: LIMITI DI EMISSIONE, DI IMMISSIONE E DI QUALITÀ

Questo decreto, emesso in seguito alla Legge Quadro sul rumore, di fatto riprende i criteri indicati dal D.P.C.M. 1/3/91 ampliandoli e sostituendoli.

### 10.1. D.P.C.M. 14-11-1997

In attuazione dell'art. 3 della L. 447/95 (*Legge Quadro sul Rumore*) è stato emanato di recente il DPCM 14/11/97 che vuole armonizzare i provvedimenti di limitazione delle emissioni sonore (anche in ossequio alle indicazioni dell'Unione Europea).

Questo decreto, che riprende in parte quanto già introdotto dal DPCM 1/3/91 e lo sostituisce nelle parti innovate, fissa due serie di valori limite:

1. Valori limite di emissione sonora (riportati nella Tabella B);
2. Valori limite assoluti di immissione sonora, (riportati nella Tabella C).

Per le emissioni sonore valgono i limiti riportati nella tabella B fino a quando non sarà emessa un'apposita norma UNI. Le sorgenti mobili ed i macchinari sono altresì soggetti alle norme di omologazione e certificazione (vedi direttive europee). Le immissioni sonore sono regolate dalla tabella C che riprende i valori già visti per il DPCM 1/3/91 e indicati anche nella L. 447/95. Sono escluse da questi limiti le fasce di rispettiva pertinenza (indicate nei relativi decreti attuativi) delle infrastrutture ferroviarie, stradali, marittime ed aeroportuali. Pur tuttavia al di fuori della fasce di pertinenza le queste sorgenti concorrono al livello di rumorosità ambientale. Il DPCM 14/11/97 conferma la validità del valore limite differenziale fissandolo a 5 dB per il giorno e 3 dB per la notte. Esclude da questi limiti se il rumore misurato a finestre aperte è inferiore a 50 dB di giorno

e 40 di notte o se il rumore misurato a finestre aperte è inferiore a 35 dB di giorno e 25 dB di notte. Inoltre il criterio differenziale non si applica per i rumori prodotti dalle infrastrutture stradali, ferroviarie, aeroportuali e marittime o da attività non connesse alle esigenze produttive, commerciali e professionali o da servizi di impianti fissi adibiti ad uso comune e limitatamente all'interno dell'edificio di appartenenza

### 10.1.1. DETERMINAZIONE DEI VALORI LIMITE DELLE SORGENTI SONORE

L'articolo 6 del DPCM 14/11/97 indica i valori di attenzione calcolati per il periodo di riferimento (già indicato dal DPCM 1/3/91 e riportato in tabella C) che per il lungo periodo (TL).

Quest'ultimo è definito come un multiplo intero del periodo di riferimento tale da caratterizzare dal punto di vista acustico il territorio.

Il valore di TL è prestabilito in funzione delle realtà specifiche locali. I valori di attenzione per i lunghi periodi si calcolano aggiungendo 10 dB ai valori diurni e 5 dB a quelli notturni indicati in tabella C (vedi dopo). Per l'adozione dei piani di risanamento acustico (già previsti dall'art. 7 della L. 447/95) basta superare uno dei due valori di attenzione. Infine il DPCM 14/11/97 riporta i valori di qualità (indicati dall'art. 2 della L. 447/95) in tabella D.

Tabella 20: Tabella A del DPCM 14/11/97

<b>CLASSE I: aree particolarmente protette:</b> rientrano in questa classe le aree nelle quali la quiete rappresenta un elemento di base per la loro utilizzazione: aree ospedaliere, scolastiche, aree destinate al riposo ed allo svago, aree residenziali rurali, aree di particolare interesse urbanistico, parchi pubblici, etc. ...
<b>CLASSE II: aree destinate ad uso prevalentemente residenziale:</b> rientrano in questa classe le aree urbane interessate prevalentemente da traffico veicolare locale, con bassa densità di popolazione, con limitata presenza di attività commerciali ed assenza di attività industriali e artigianali.
<b>CLASSE III: aree di tipo misto:</b> rientrano in questa classe le aree urbane interessate da traffico veicolare locale o di attraversamento, con media densità di popolazione, con presenza di attività commerciali, uffici, con limitata presenza di attività artigianali e con assenza di attività industriali; aree rurali interessate da attività che impiegano macchine operatrici
<b>CLASSE IV: aree di intensa attività umana:</b> rientrano in questa classe le aree urbane interessate da traffico veicolare locale o di attraversamento, con alta densità di popolazione, con elevata presenza di attività commerciali, uffici, con presenza di attività artigianali; le aree in prossimità di strade di grande comunicazione e di linee ferroviarie; le aree portuali, le aree con limitata presenza di piccole industrie.
<b>CLASSE V: aree prevalentemente industriali:</b> rientrano in questa classe le aree interessate da insediamenti industriali e con scarsità di abitazioni.
<b>CLASSE VI: aree esclusivamente industriali:</b> rientrano in questa classe le aree esclusivamente interessate da attività industriali e prive di insediamenti abitativi.

Tabella B: Valori limite di emissione – Leq in dB(A)		
Classi di destinazione d'uso del territorio	TEMPI DI RIFERIMENTO	
	Diurno (06-22.00)	Notturmo (22.00-06.00)
I aree particolarmente protette	45	35
II aree prevalentemente residenziali	50	40
III aree di tipo misto	55	45
IV aree di intensa attività umana	60	50

V	aree prevalentemente industriali	65	55
VI	aree esclusivamente industriali	65	65
<b>Tabella C: Valori limite di immissione – Leq in dB(A)</b>			
Classi di destinazione d'uso del territorio		TEMPI DI RIFERIMENTO	
		Diurno (06-22.00)	Notturmo (22.00-06.00)
I	aree particolarmente protette	50	40
II	aree prevalentemente residenziali	55	45
III	aree di tipo misto	60	50
IV	aree di intensa attività umana	65	55
V	aree prevalentemente industriali	70	60
VI	aree esclusivamente industriali	70	70
<b>Tabella D: Valori di qualità – Leq in dB(A)</b>			
Classi di destinazione d'uso del territorio		TEMPI DI RIFERIMENTO	
		Diurno (06-22.00)	Notturmo (22.00-06.00)
I	aree particolarmente protette	47	37
II	aree prevalentemente residenziali	52	42
III	aree di tipo misto	57	47
IV	aree di intensa attività umana	62	52
V	aree prevalentemente industriali	67	57
VI	aree esclusivamente industriali	70	70

Tabella 21: Tabelle B, C, D del DPCM 14/11/97

## 10.2. ZONIZZAZIONE ACUSTICA DI CATANIA

La città di Catana si è dotata di recente, novembre 2012, della zonizzazione acustica (Piano Comunale di Classificazione Acustica, **PCCA**) ai sensi del sopra citato DM. E' stato anche approvato un regolamento che indica i seguenti valori limiti assoluti:

Classi di destinazione d'uso del territorio		Valori limite di emissione Leq in dB(A)		Valori limite di immissione Leq in dB(A)	
		diurno 06.00-22.00	notturno 22.00-06.00	diurno 06.00-22.00	notturno 22.00-06.00
<b>I</b>	<b>Aree particolarmente protette</b>	<b>45</b>	<b>35</b>	<b>50</b>	<b>40</b>
<b>II</b>	<b>Aree prevalentemente residenziali</b>	<b>50</b>	<b>40</b>	<b>55</b>	<b>45</b>
<b>III</b>	<b>Aree di tipo misto</b>	<b>55</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	<b>50</b>
<b>IV</b>	<b>Aree di intensa attività umana</b>	<b>60</b>	<b>50</b>	<b>65</b>	<b>55</b>
<b>V</b>	<b>Aree prevalentemente industriali</b>	<b>65</b>	<b>55</b>	<b>70</b>	<b>60</b>
<b>VI</b>	<b>Aree esclusivamente industriali</b>	<b>65</b>	<b>65</b>	<b>70</b>	<b>70</b>

Tabella 22: Tabella dei valori assoluti di emissione ed immissione per Catania



**COMUNE DI CATANIA**  
Direzione Ecologia e Ambiente



## Piano Comunale di Classificazione Acustica

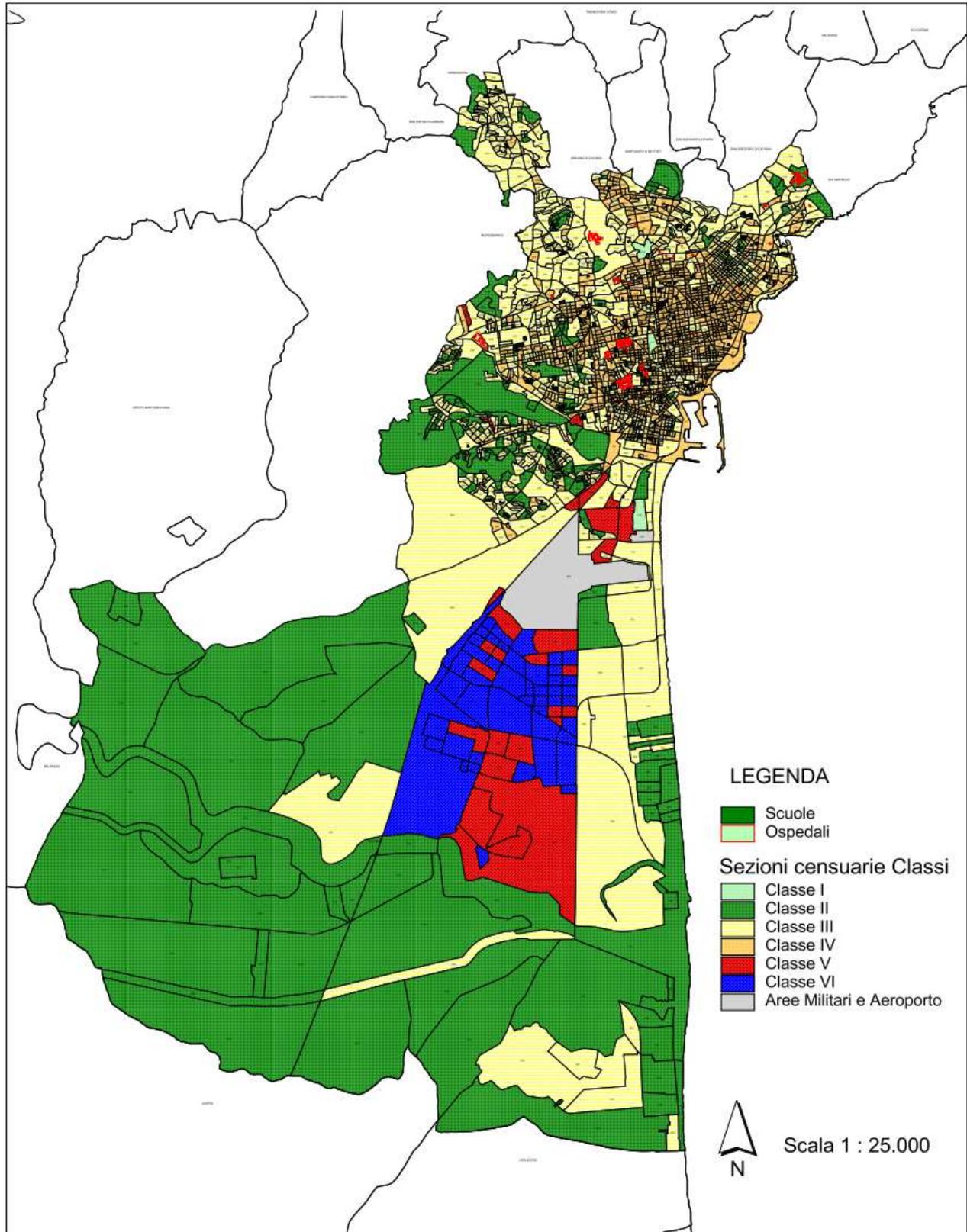


Figura 101: Zonizzazione acustica di Catania

# 11. REQUISITI ACUSTICI DEGLI EDIFICI

Tutti Noi subiamo gli effetti di disturbo del rumore nei centri abitati. In particolare subiamo gli effetti del traffico veicolare esterno, del rumore degli impianti interni (ascensori, impianti di climatizzazione, impianti idrici e di scarico, ...). E' vero che non è mai stato preso in considerazione un qualsivoglia criterio di progetto degli edifici che tenesse conto del problema del rumore. Purtroppo ancora oggi il rumore non è un parametro di progetto. Errore grave perché quando il rumore si manifesta e dà luogo alla reazione comunitaria è già tardi per prendere provvedimenti. Riparare i problemi della rumorosità è sempre costoso e spesso traumatico.

## 11.1. I REQUISITI ACUSTICI DEGLI EDIFICI

Nella Legge quadro N. 447 del 26.10.1995 si stabiliscono, come già indicato in precedenza, i principi fondamentali *“per la tutela dell’ambiente esterno e dell’ambiente abitativo dall’inquinamento acustico”*.

Essa contiene una serie di importanti “definizioni”<sup>11</sup>, assegna i compiti e/o le competenze di Comuni, Province e Regioni (sostanzialmente tenuti a eseguire la classificazione acustica del

---

<sup>11</sup> Alcune delle quali meritevoli di considerazione, quale quella di “inquinamento acustico”: qui oggetto dell’attenzione non è solo l’uomo (con il suo ambiente abitativo e l’ambiente esterno), ma anche gli “ecosistemi”, i

territorio e, ove necessario, i relativi piani di risanamento acustico), e fissa le competenze dello Stato.

Tra queste ricordiamo la facoltà di determinare i valori limite di immissione, emissione, attenzione e qualità; definire la normativa tecnica per collaudo e omologazione; fissare le tecniche di misura dell'inquinamento acustico; coordinare le attività di ricerca; definire i requisiti acustici passivi degli edifici; i requisiti degli allarmi acustici. i requisiti dei locali di pubblico spettacolo, i criteri di misura del rumore nei trasporti; nonché predisporre campagne di informazione sul rumore e definire la figura di "tecnico competente". A corredo della Legge 447, sono stati poi pubblicati una serie di decreti attuativi, che alla data attuale sono i seguenti:

1. D.M. 11.12.96: "Applicazione del criterio differenziale per gli impianti a ciclo produttivo continuo"(G.U. 4.3.97)
2. DPCM 14.11.97: "Determinazione dei Valori limite delle sorgenti sonore" (G.U. 1.12.97)
3. D.M. 31.10.97: "Metodologia di misura del rumore aeroportuale" (G.U. 15.11.97)
4. DPCM 18.9.97 "Determinazione dei requisiti acustici delle sorgenti sonore nei luoghi di intrattenimento danzante" (G.U. 6.10.97)
5. DPCM 19.12.97: "Proroga dei termini per l'acquisizione e l'installazione delle apparecchiature di controllo e registrazione nei luoghi di intrattenimento danzante..."
6. DPCM 5.12.97: "Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici" (G.U. 22.12.97)
7. D.M. 16.3.98: "Tecniche di rilevamento e misura dell'inquinamento acustico" (G.U. 1.4.98)

Come si vede, si tratta di una ricca serie di testi di legislativi che hanno movimentato parecchio l'ambiente di professionisti e tecnici del settore. Tra questi spicca per interesse, in questa sede, quello che prescrive le caratteristiche acustiche degli edifici nei confronti del rumore proveniente dall'esterno e dall'interno del corpo di fabbrica (DPCM 5.12.97).

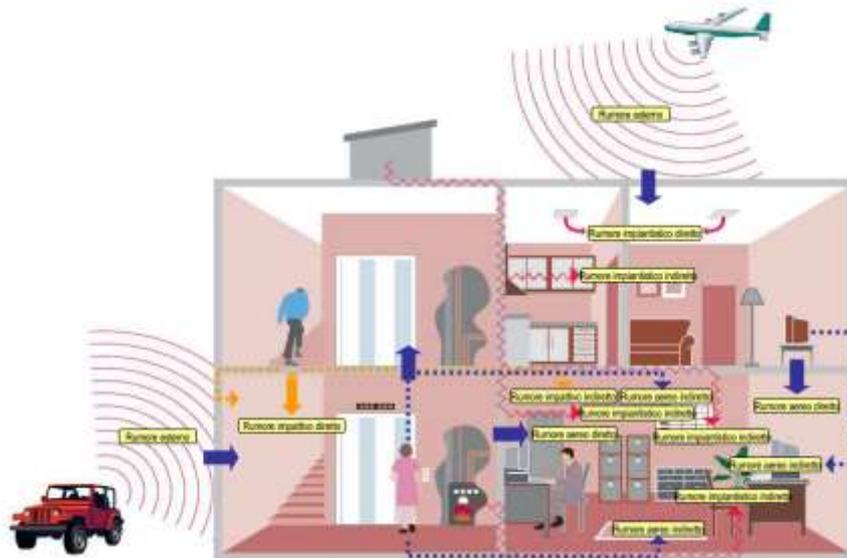


Figura 102: Interazione dell'edificio con l'ambiente sonoro

"beni materiali" e i "monumenti". Anche questi elementi possono essere in effetti deteriorati da emissioni di rumori (e vibrazioni). Rilevanti sono altresì le definizioni dei limiti di emissione, di immissione, di attenzione e di qualità, che concorrono a caratterizzare il clima acustico delle aree urbane, quantitativamente precisati nei successivi decreti attuativi.

Prima però di avviarcì all'esame puntuale del testo di legge, è importante capire con quali livelli di rumore urbano l'edificio deve confrontarsi e da quali immissioni deve difenderci. Ciò sarà sinteticamente discusso nella sezione seguente.

## 11.2. REQUISITI ACUSTICI PASSIVI DEGLI EDIFICI

Dei requisiti acustici passivi degli edifici parla il DPCM 5.12.97. Si tratta di un testo brevissimo, che contiene definizioni di grandezze acustiche caratteristiche, alcuni rinvii a norme UNI e ISO, una tabella di classificazione degli edifici e un'altra che riporta i valori limite delle succitate grandezze caratteristiche. I componenti edili che il testo di legge considera e che effettivamente costituiscono barriera al rumore sono tre: i tramezzi, le facciate e i solai. Ciascuno di questi viene caratterizzato da una grandezza acustica che, in quanto espressa da un sol valore numerico, prende il nome di "indice".

Si ha nei tre casi quanto evidenziato in Tabella 23. La norma impone che per gli edifici, classificati secondo la Tabella 24, siano rispettati i valori limite espressi nella Tabella 25.

Si preannuncia quindi un confronto tra valori sperimentali e valori limite. Ora, il confronto tra grandezze acustiche può risultare problematico per via della loro dipendenza dalla frequenza.

Esse si presentano infatti solitamente in formato vettoriale, ossia come "spettro" di valori. Al fine di rendere il confronto immediato e inequivocabile, conviene ricorrere agli "indici".

Il problema allora si sposta a dedurre l'indice dallo spettro; ciò che si fa, come illustrato tra breve, con delle procedure "normalizzate" (ossia convenzionali, ma universalmente accettate), alquanto semplici e rapide. Prima di inoltrarci nella descrizione nelle procedure di valutazione delle grandezze di pratico interesse per le verifiche di legge, è necessario richiamare alcune cognizioni fondamentali.

Tabella 23: Nomenclatura del DPCM 5.12.97

Componente edile	INDICE CARATTERISTICO	
	NOME	SIMBOLO
Tramezzi	Potere fonoisolante apparente di partizione tra ambienti	$R_w$
Facciate	Isolamento acustico standardizzato di facciata	$D_{2m, n, T, w}$
Solai	Livello del rumore di calpestio	$L_{n, w}$

Tabella 24: Classificazione degli edifici secondo DPCM 5.12.97

CATEGORIA	EDIFICI ADIBITI A
A	Residenze o assimilabili
B	Uffici o assimilabili
C	Alberghi, pensioni ed attività assimilabili
D	Ospedali, cliniche, case di cura o assimilabili
E	Attività scolastiche a tutti i livelli o assimilabili
F	Attività ricreative o di culto o assimilabili
G	Attività commerciali o assimilabili

Tabella 25: Valori limite degli indici acustici caratteristici secondo DPCM 5.12.97

Classe	Edifici	$R_w$ (*)	$D_{2m, n, T, w}$	$L_{n, w}$	$L_{ASmax}$	$L_{Aeq}$
		dB	dB	dB	dB(A)	dB(A)

D	Ospedali	55	45	58	35	25
A,C	Residenze & alberghi	50	40	63	35	35
E	Scuole	50	48	58	35	25
B,F,G	Uffici & negozi	50	42	55	35	35

(\*) Valori riferiti a elementi di separazione tra due distinte unità immobiliari

### 11.2.1. TEMPO DI RIVERBERAZIONE

E' definito (come già indicato in precedenza) come il tempo che intercorre dalla disattivazione della sorgente sonora perché il livello di pressione sonora in ambiente diminuisca di 60 dB. Viene solitamente indicato con  $T_{60}$  o più semplicemente con T.

E' adatto a caratterizzare gli ambienti confinati dal punto di vista acustico. Si capisce infatti che, all'estinzione della sorgente, il livello di pressione sonora decade esponenzialmente tanto più rapidamente quanto più acusticamente assorbente è il locale. Viceversa, tale transitorio di estinzione sarà tanto più lento quanto più questo è riverberante. Naturalmente il maggiore o minore grado di riverberazione dipende dalle caratteristiche geometriche e acustiche della sala. .

Da un bilancio dell'energia sonora in ambiente è possibile ricavare la relazione fondamentale di calcolo, che porta anche il nome di formula di Sabine:

$$T_{60} = 0.16 \frac{V}{A}$$

dove V (m<sup>3</sup>) è il volume ambiente e A (m<sup>2</sup>) è il cosiddetto "assorbimento acustico" , dato da:

$$A = \sum_k S_i \alpha_i$$

essendo  $S_i$  la generica superficie del materiale di rivestimento del locale ed  $\alpha_i$  il suo coefficiente di assorbimento acustico, alla data frequenza f.

Dunque anche A e  $T_{60}$  dipendono dalla frequenza. Il tempo di riverberazione, oltre che calcolarsi a tavolino con le relazioni precedenti, può, più immediatamente e più attendibilmente (soprattutto per gli ambienti arredati), ricavarsi per via sperimentale, con una misura in situ.

Allo scopo, tra le tante tecniche disponibili, si può operare con un generatore di rumore bianco (allo scopo di eccitare con uguale probabilità tutti i modi propri della sala), che una volta portato a regime viene istantaneamente spento.

Un fonometro registra la coda sonora e da questa, per via automatica o manuale, è possibile risalire al  $T_{60}$ .

Procedendo sistematicamente per tutte le frequenze, ne discende lo spettro dei valori  $T_{60}$  necessari a caratterizzare l'ambiente.

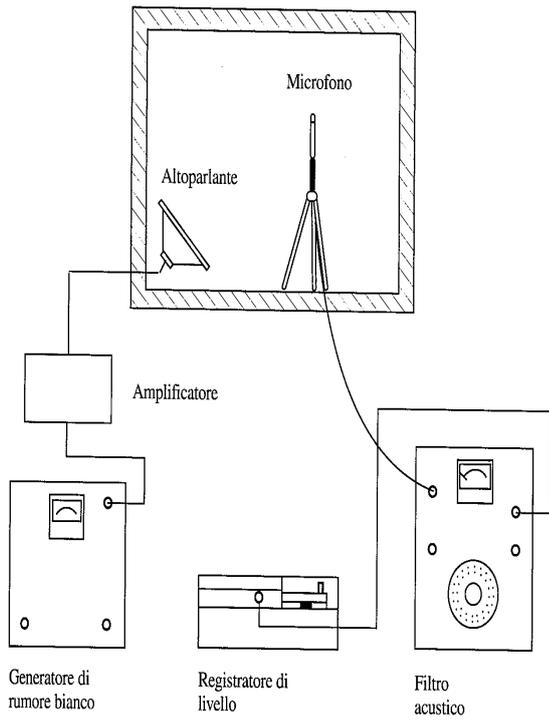


Figura 103: Apparato sperimentale per la misura del tempo di riverberazione  $T_{60}$

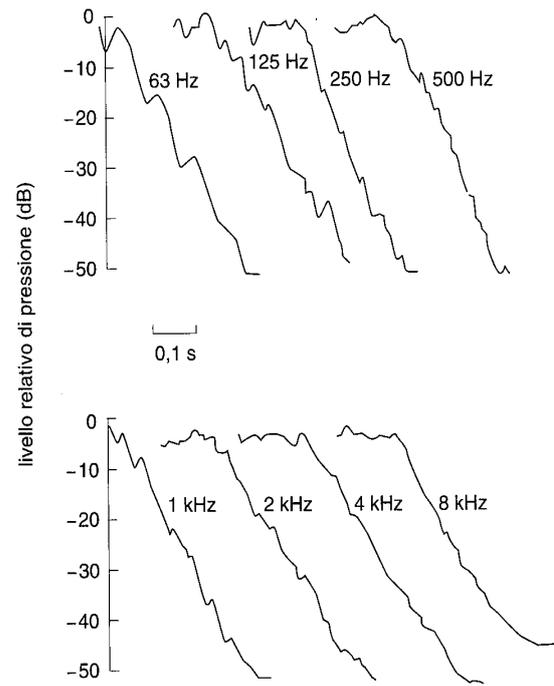


Figura 104: Esempi di code sonore alle varie frequenze

### 11.2.2. POTERE FONOIOLANTE

Il potere fonoisolante, anch'esso definito e studiato in precedenza, è proprio dei divisori acustici, ossia di quegli elementi che costituiscono barriera acustica tra l'ambiente disturbante e l'ambiente disturbato. Tali elementi possono essere i muri di tamponamento all'interno di una stessa unità immobiliare, le pareti di confine tra due unità immobiliari, le facciate degli edifici, i solai etc.

Detto  $\tau$  il coefficiente di trasmissione sonora, espresso come rapporto tra l'energia trasmessa rispetto a quella incidente, il potere fonoisolante  $R$  è dato dalla seguente relazione:

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau}$$

Ancora sulla base di semplici considerazioni energetiche, è possibile correlare  $R$  alle caratteristiche dei due locali e a quelle del divisorio :

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S_d}{A} \quad [86]$$

Qui<sup>12</sup>  $L_1$  ed  $L_2$  sono il livello di pressione sonora rispettivamente dell'ambiente disturbante e dell'ambiente disturbato quando nel primo è in funzione la sorgente sonora;  $S_d$  è la superficie del divisorio e  $A$  è l'assorbimento acustico dell'ambiente disturbato. Quest'ultima grandezza può a sua volta essere determinata indirettamente attraverso una misura del  $T_{60}$ . La formula di uso pratico è pertanto:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S_d}{0.16V / T_{60}} \quad [87]$$

In Figura 105 è riportato l'assetto sperimentale necessario per la determinazione di  $R$ .

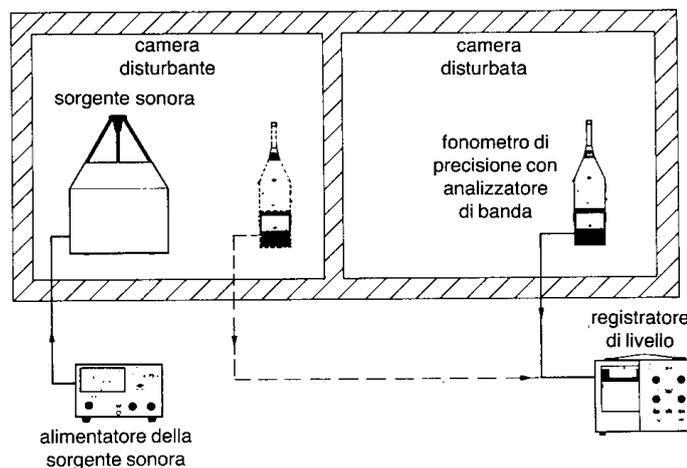


Figura 105: Disposizione sperimentale per la misura del Potere Fonoisolante

I materiali hanno un potere fonoisolante che varia con la frequenza con un andamento tipico dato nella figura seguente dove è possibile suddividere la curva in tre zone:

- Zona di bassa frequenza ove si ha l'effetto della rigidità;
- Zona della legge di massa ove si ha un effettivo smorzamento,

- Zona delle alte frequenze. Al di sopra della frequenza critica (Effetto di coincidenza).

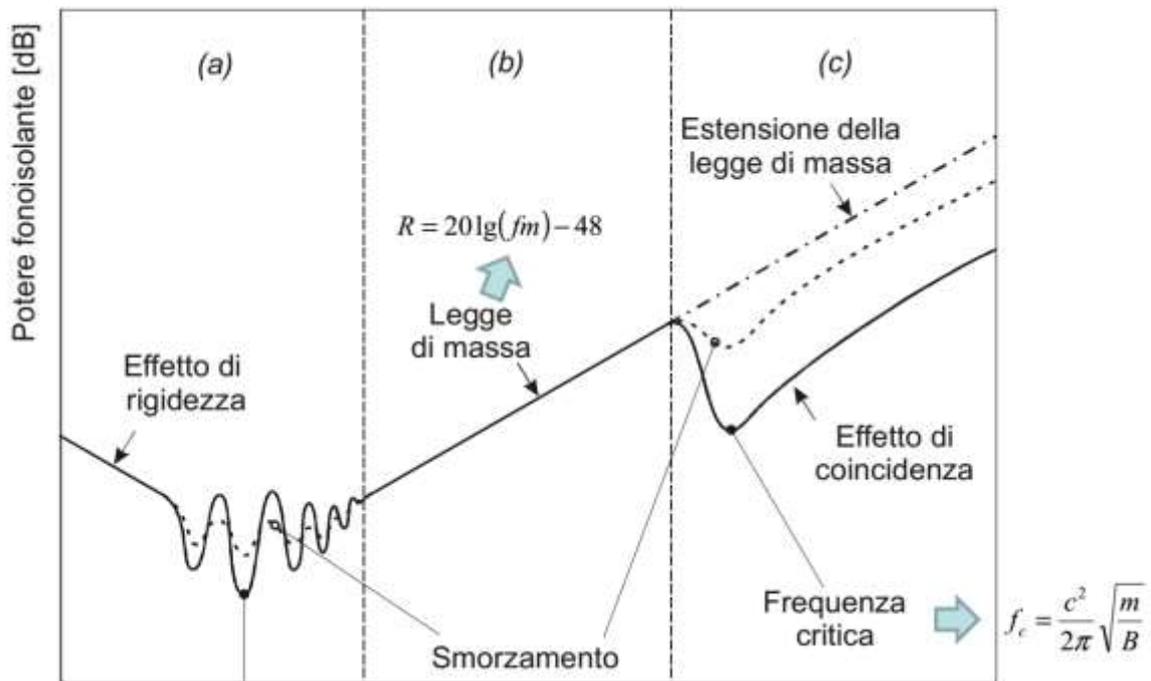


Figura 106: Andamento tipico del potere fonoisolante in funzione della frequenza.

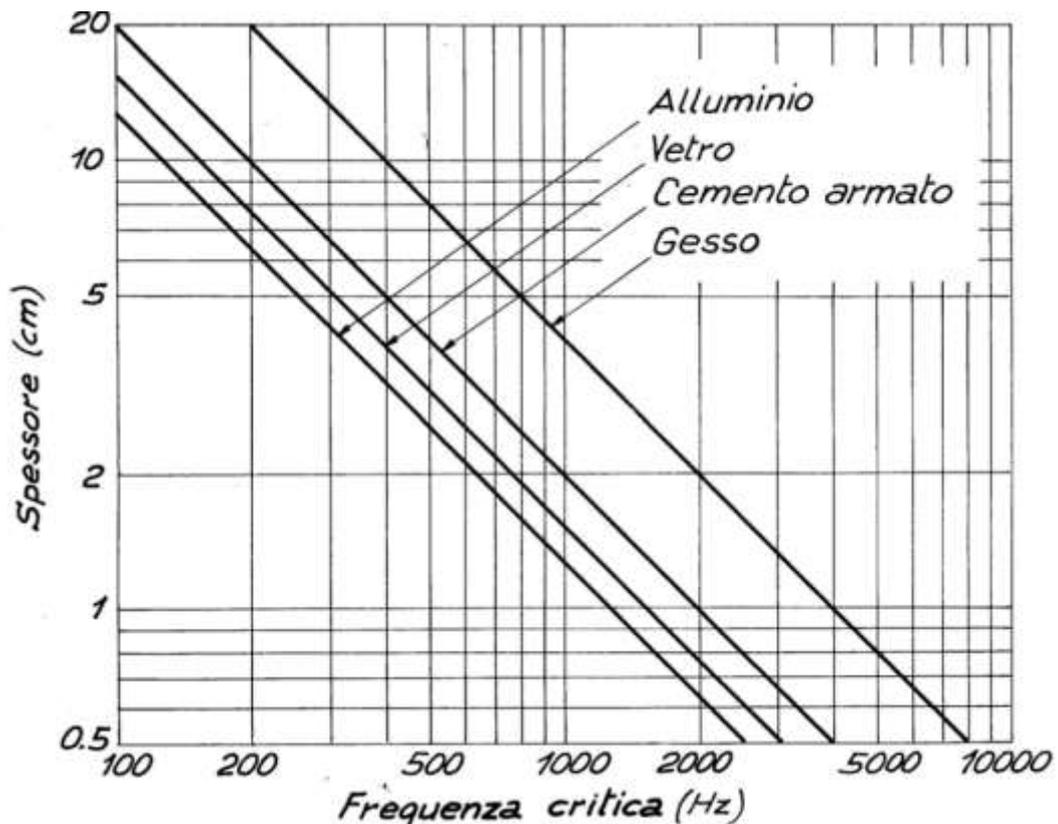


Figura 107: Frequenza critica per alcuni materiali al variare dello spessore

<sup>12</sup> Questa relazione in verità trascura il contributo delle trasmissioni laterali del rumore (flanking transmission), ossia quelle che giungono in ambiente attraverso le strutture di contorno del divisorio.

### 11.2.3. LEGGE DI MASSA PER INCIDENZA DIFFUSA

La legge di massa per incidenza diffusa si applica solo agli elementi piani omogenei come le pareti o i solai e non alle tubazioni.

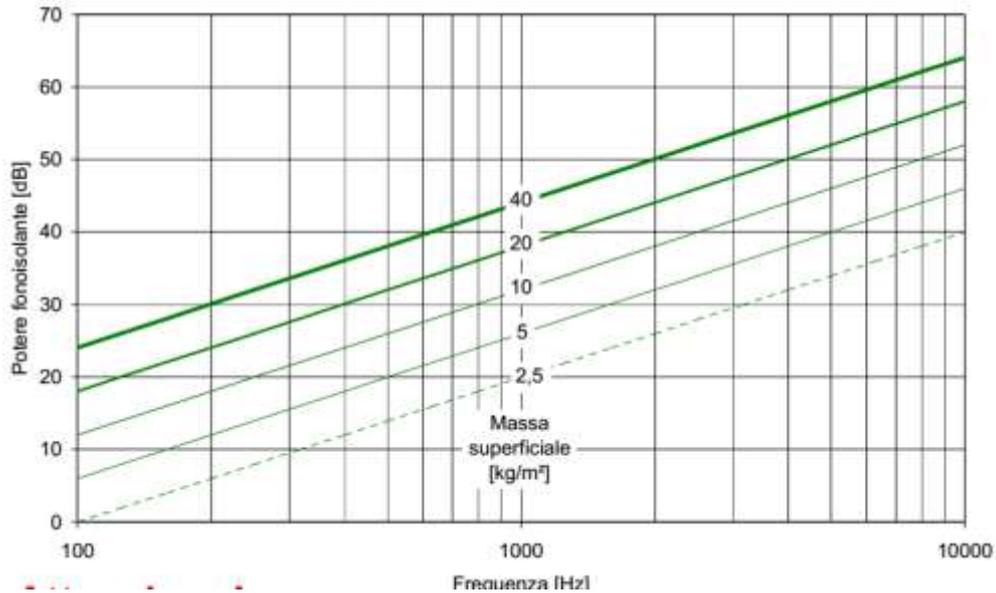


Figura 108: Legge di massa per incidenza diffusa

### 11.2.4. POTERE FONOISOLANTE APPARENTE: $R'_w$

La capacita di una partizione realizzata in opera di limitare il passaggio di rumori aerei (voci, TV, radio, ecc.) e definita dal descrittore indice di potere fonoisolante apparente ( $R'_w$ ).

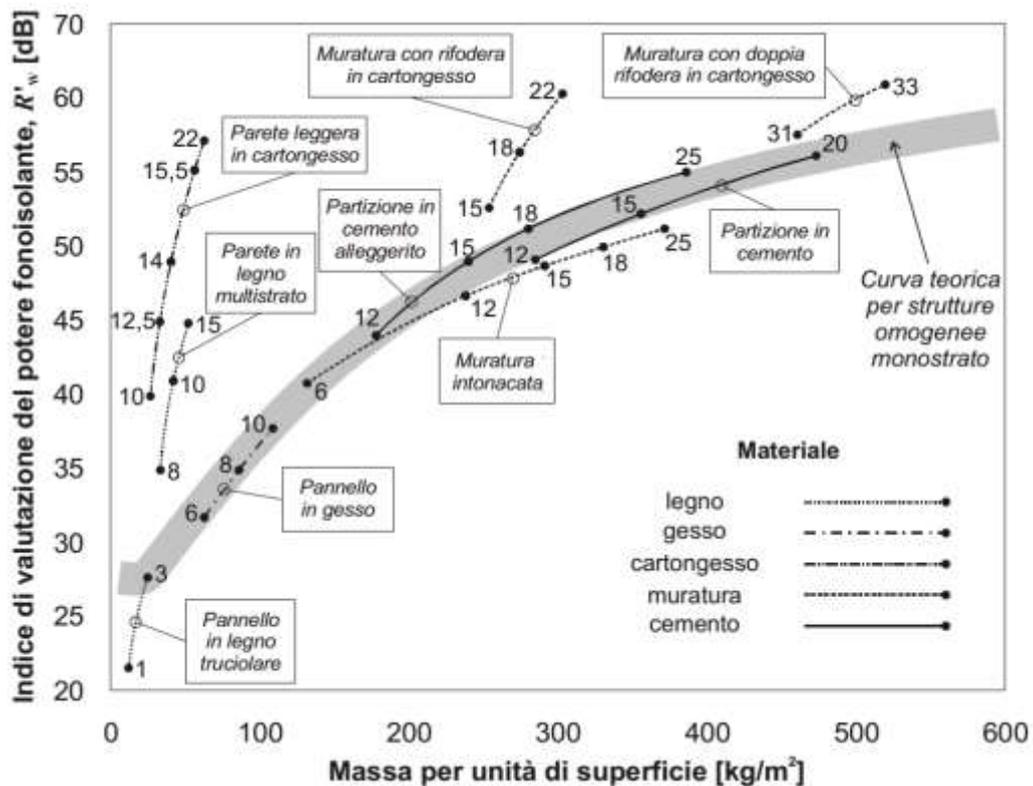


Figura 109: Legge di massa apparente di elementi edilizi

Il parametro indica in sostanza “quanti dB è in grado di eliminare la partizione”. Pertanto più il valore di  $R'_w$  è alto, migliore è la prestazione di isolamento.

Si ricordi che:

- Il potere fonoisolante,  $R$ , misurato in laboratorio, è rappresentativo delle caratteristiche intrinseche di fono isolamento dell'elemento edilizio, indipendentemente dalle condizioni in opera.
- Il potere fonoisolante apparente,  $R'$ , misurato in opera, è rappresentativo delle prestazioni in opera dell'elemento edilizio inserito in uno specifico contesto.
- L'isolamento acustico normalizzato rispetto al tempo di riverberazione,  $D_nT$ , misurato in opera, definisce il grado di protezione che può offrire l'insieme degli elementi edilizi rispetto ad uno specifico ambiente ricevente.

Si confrontino le procedure indicate nella seguente figura.

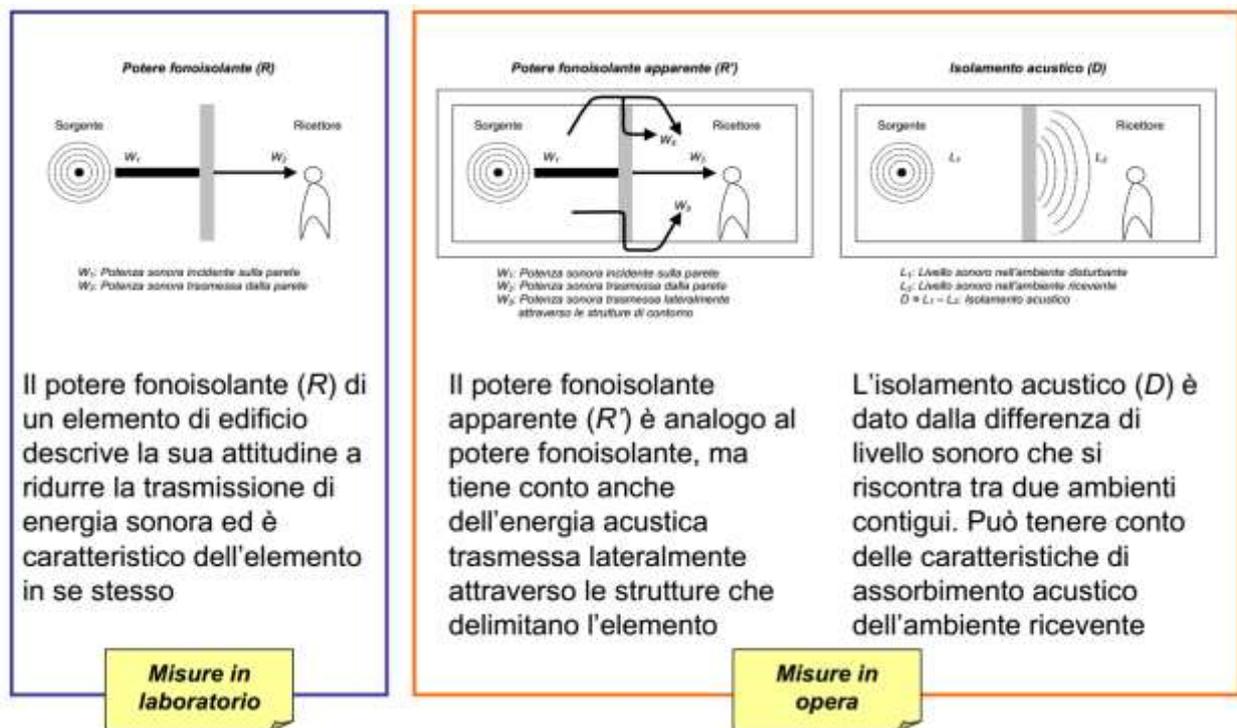


Figura 110: Confronto fra le diverse definizioni di potere fonoisolante

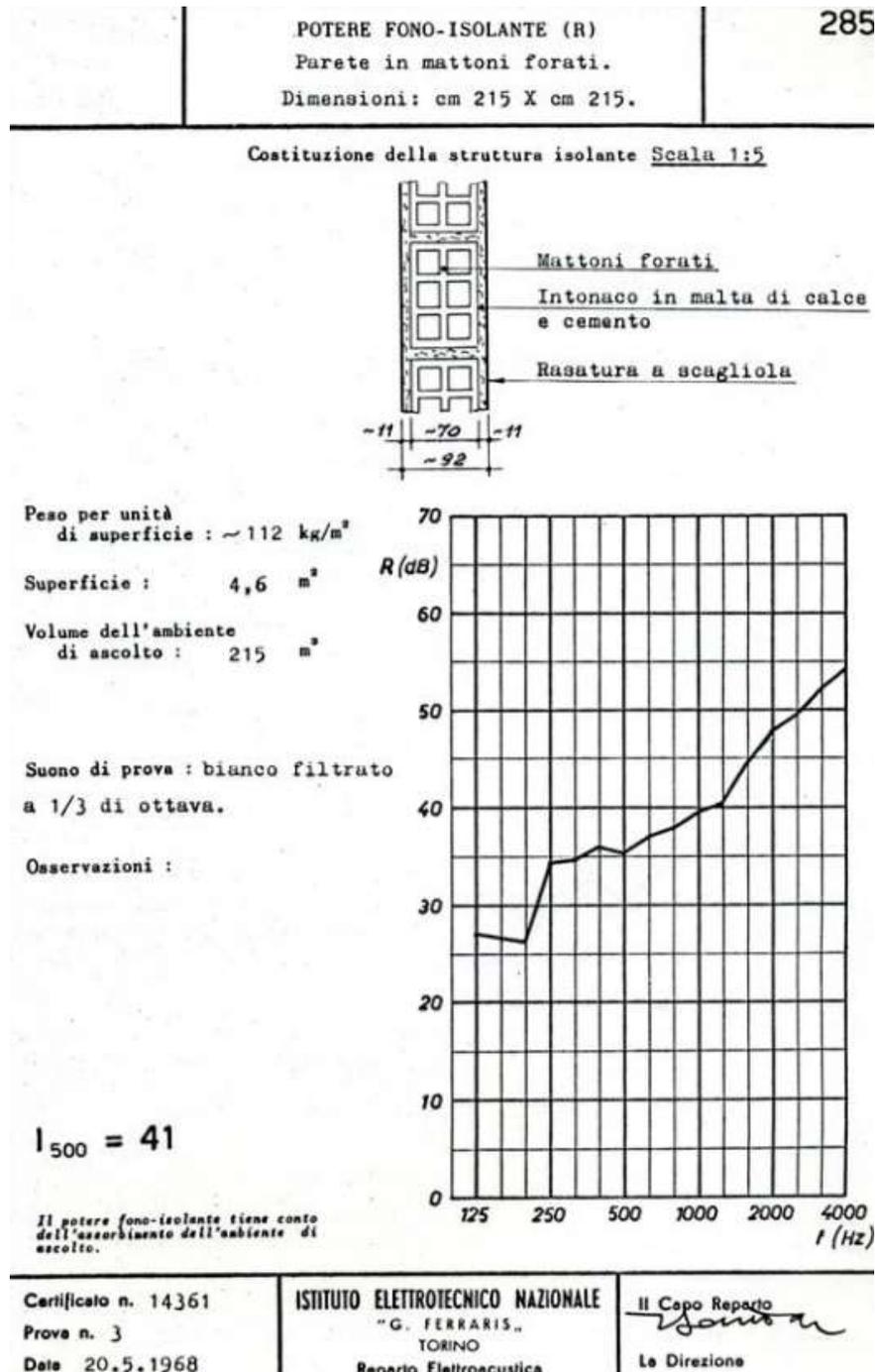


Figura 111: Esempio di Certificazione del Potere Fonoisolante

### 11.2.5. PERCORSI DI TRASMISSIONE – PROPAGAZIONE PER VIA AEREA E STRUTTURALE

Il suono si propaga lungo vari percorsi da un ambiente ad un altro, come illustrato nella seguente figura. Un calcolo analitico della trasmissione sonora non è facile a causa delle interazioni fra le frazioni sonore trasmesse. Anche se esistono metodi di calcolo (invero assai complessi) per calcolare le frazioni trasmesse e quindi gli indici di trasmissione invero questi si dimostrano assai poco affidabili a causa, spesso, dell'eterogeneità dei materiali e dei ponti acustici che si verificano nelle costruzioni (tubazioni metalliche, marre, infissi, armature metalliche, ...).

Analogamente complessa è la trasmissione sonora in ambienti, vedi figura successiva, che può avvenire per via aerea, (a), per vibrazione strutturale, (b), e per combinazione di entrambi i metodi, (c).

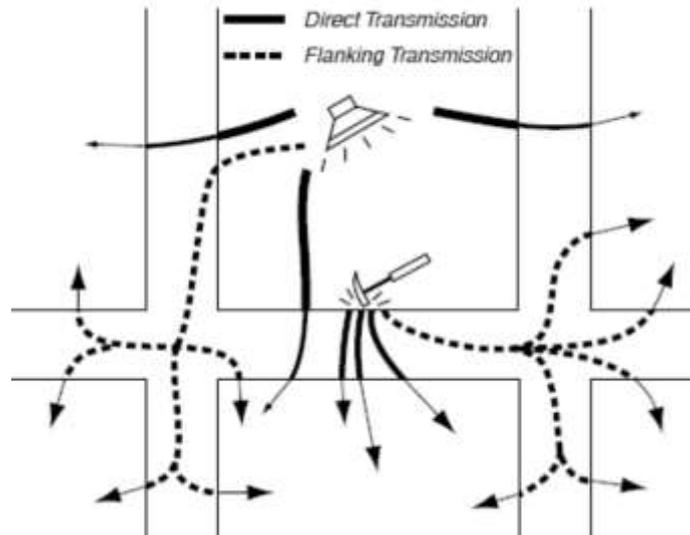


Figura 112: Percorsi di trasmissione del suono

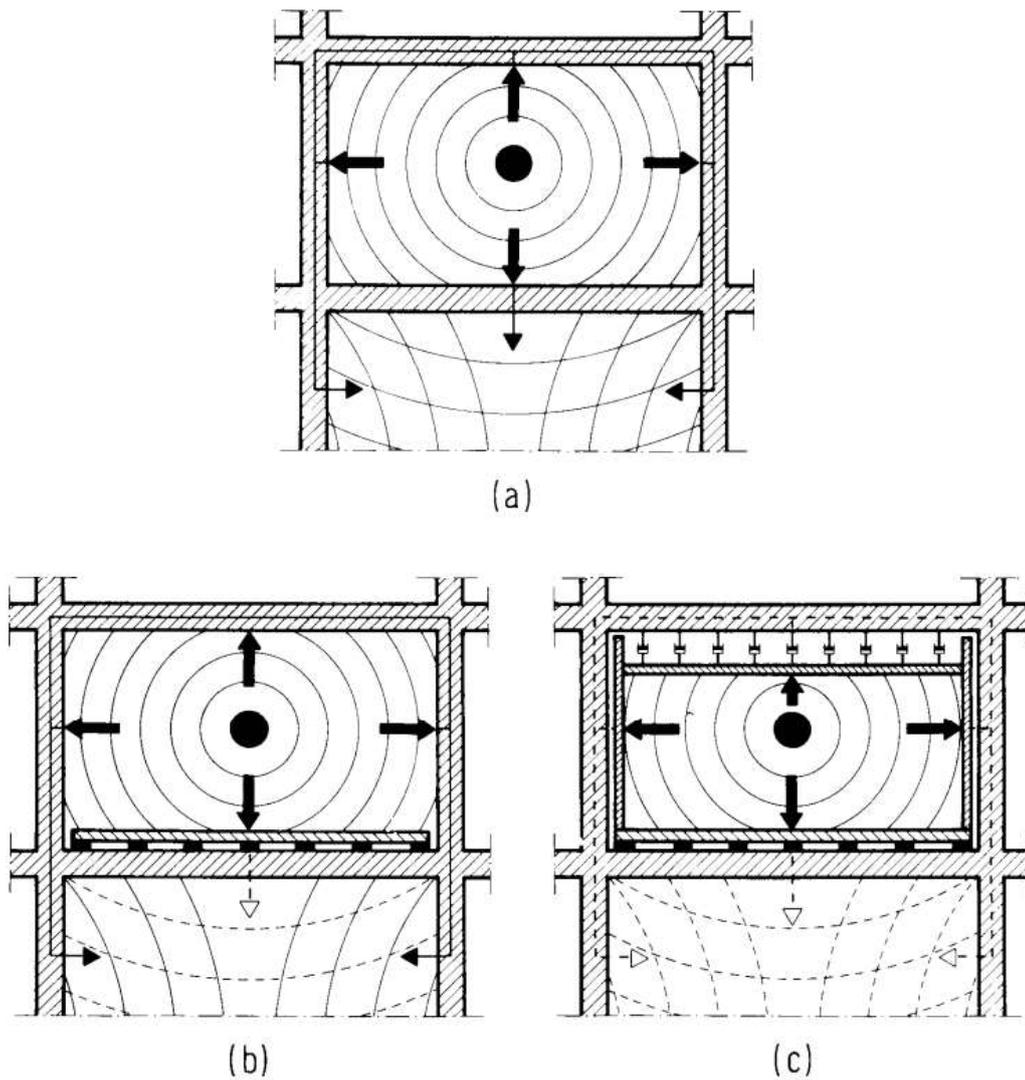


Figura 113: Trasmissione del rumore negli ambienti

Particolare importanza riveste la generazione del rumore nelle reti di scarico, come illustrato in figura seguente.

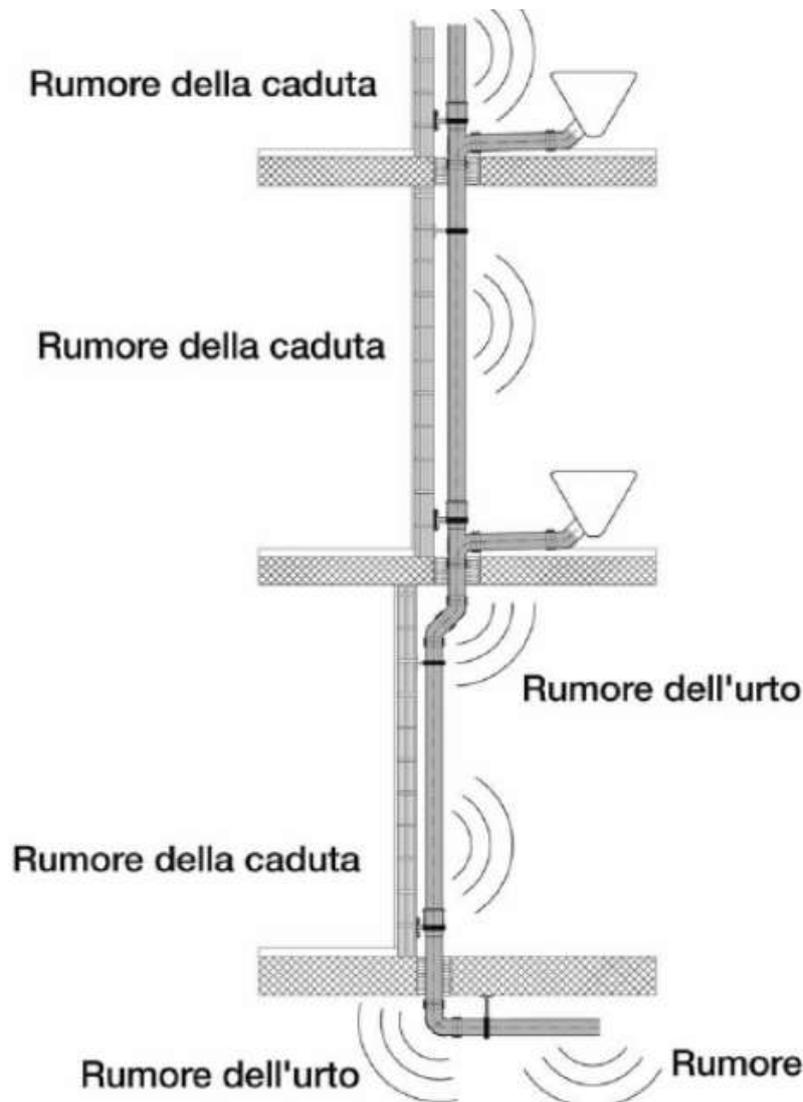


Figura 114: Rumore generato nelle reti di scarico

Si hanno i seguenti rumori:

- **Rumori della caduta:** sono rumori causati dall'acqua che cade verso il basso all'interno di un tubo
- **Rumori dell'urto:** sono causati dall'impatto dell'acqua sui cambiamenti di direzione dell'impianto. L'energia cinetica viene parzialmente trasformata in energia acustica. L'acqua perde velocità e dopo l'impatto il suo scorrimento è decisamente più lento.
- **Rumori del deflusso:** sono causati dallo scorrimento dell'acqua nella tubazione orizzontale. L'acqua defluisce in modo silenzioso lungo la parete interna del tubo, movimento silenzioso che viene disturbato solo dalla presenza di cambiamenti di direzione della condotta.

I rumori generati dalle reti di scarico possono trasmettersi per via aerea e per via strutturale, come illustrato nella seguente figura.

Per limitare i rumori aerei occorre:

- – adottare tubi di massa adeguata
- – inserire le tubazioni in cavedi impiantistici.

Per limitare i rumori “strutturali” occorre:

- – utilizzare collari di tipo silenziato (materiale elastico)
- – inserire materiale elastico tra tubazioni e attraversamenti murari.

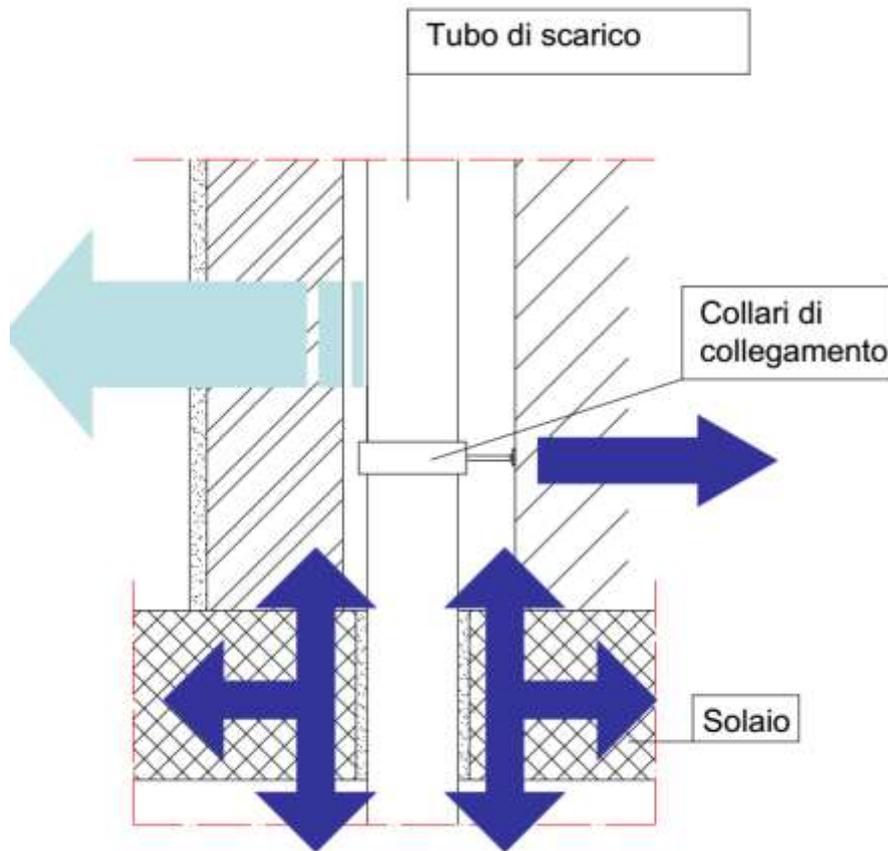


Figura 115: Trasmissione dei rumori delle reti di scarico

### 11.2.6. CORRETTA PROGETTAZIONE EDILIZIA

Una progettazione della disposizione dei locali acusticamente ottimale si realizza nel modo più efficace e più vantaggioso rispettando le seguenti raccomandazioni:

- una disposizione concentrata dei locali sanitari e della cucina
- una sovrapposizione dei locali sanitari a piani diversi
- una disposizione centrale dei vani tecnici nell'area dei locali sanitari
- evitare la vicinanza degli impianti con i locali sensibili al rumore
- i locali sensibili al rumore devono essere separati dai locali sanitari mediante pareti divisorie prive di installazioni e con un sufficiente valore fonoisolante ( $>200 \text{ kg/m}^2$ ).

La disposizione delle stanze deve essere eseguito con cura cercando di sovrapporre stanze di diversi appartamenti con la stessa destinazione d'uso (camera-camera, bagno-bagno, cucina-cucina...).

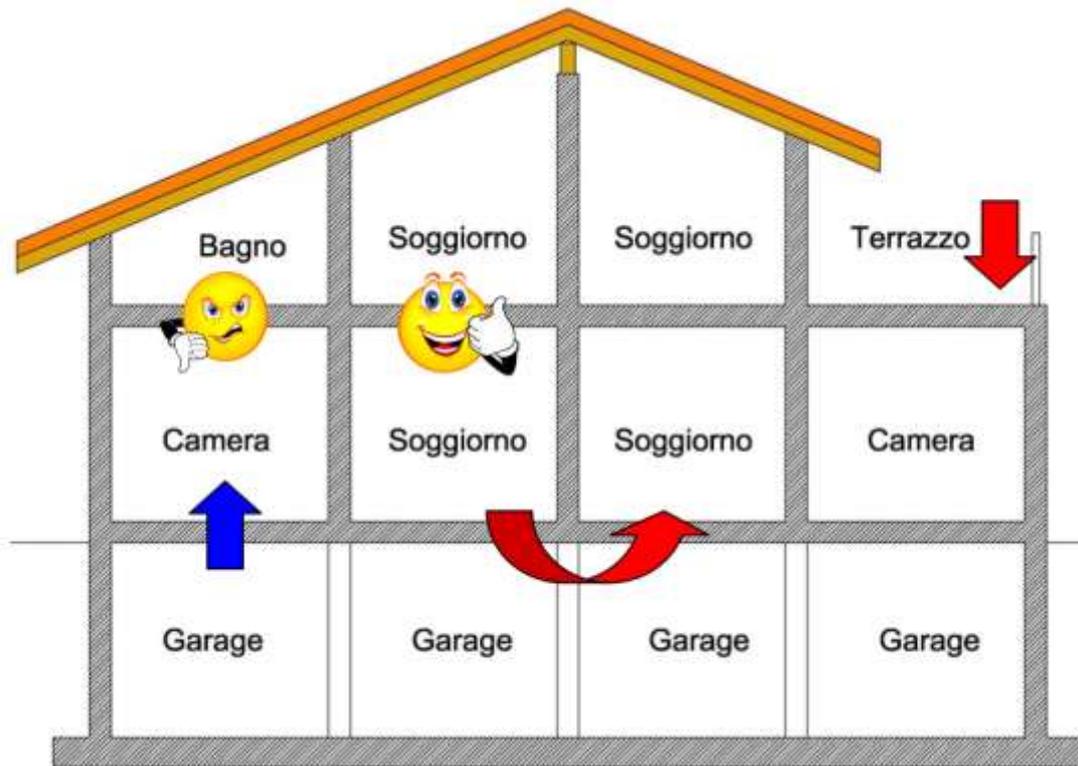


Figura 116: Corretta disposizione degli ambienti

### 11.2.7. ISOLAMENTO ACUSTICO DI FACCIATA: $D2_{M,N,Tw}$

L'indice di isolamento acustico di facciata ( $D2_{m, n, Tw}$ ) caratterizza la capacità di partizione di abbattere i rumori aerei provenienti dall'esterno. Anche in questo caso il parametro indica in sostanza "quanti dB" e in grado di eliminare la facciata. Alti valori di  $D2_{m, n, Tw}$  indicano migliori prestazioni di isolamento.

### 11.2.8. INDICE DI VALUTAZIONE DEL POTERE FONOIOLANTE

Il potere fonoisolante a sua volta dipende dalla frequenza. Come sopra ricordato, è utile poter disporre di una quantità che esprima in forma sintetica le caratteristiche acustiche dell'elemento in esame. Quest'esigenza si verifica, ad esempio, nelle prescrizioni dei requisiti di capitolato. Nella classificazione di elementi costruttivi, nelle dichiarazioni di idoneità di componenti edilizi, ecc.

Il problema è affrontato nella Norma UNI 8270/7 (conforme alle Norme EN-ISO e richiamata dal DPCM 5.12.97) nella quale sono contenuti criteri per dedurre questo indice a un sol numero. Nella terminologia italiana questo prende anche il nome di "indice di valutazione".

Il metodo consiste nel confronto tra la curva sperimentale del potere fonoisolante e una curva limite convenzionalmente assunta (Figura 117). Per tentativi o con l'aiuto del calcolatore, si ricerca una condizione di accordo tra le due curve definita dalla seguente condizione: "la media degli scarti sfavorevoli della curva sperimentale rispetto alla curva limite non deve superare i 2 dB". Per scarto sfavorevole si intende, in questo caso, lo scarto negativo, tra la curva limite e quella sperimentale. Allorché la condizione di accordo è stata trovata, l'indice di valutazione viene ricavato dal valore dell'ordinata corrispondente a 500 Hz sulla curva limite.

La Figura 118 riporta l'esempio di determinazione dell'indice di valutazione, relativo ad una misura di potere fonoisolante .

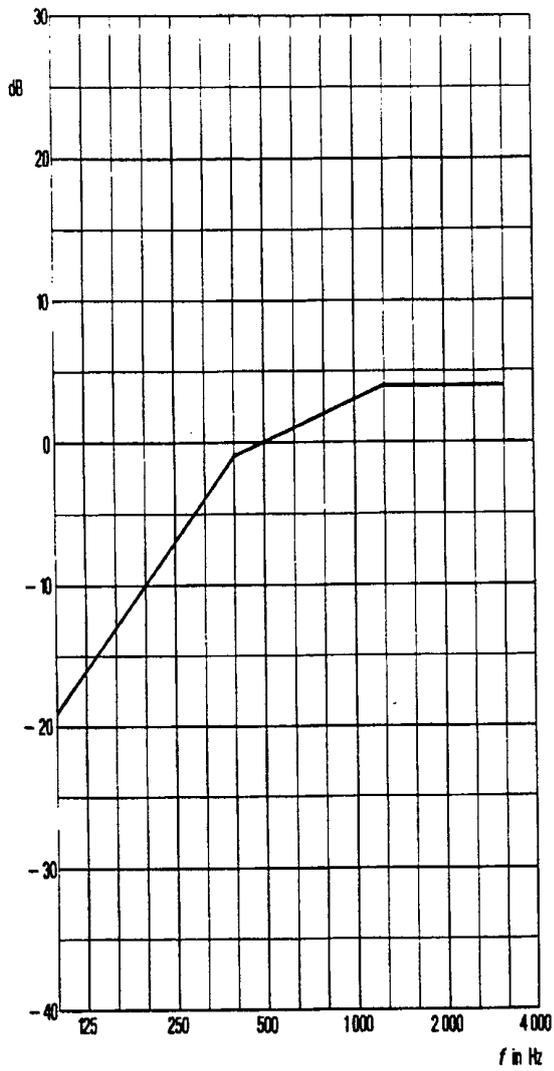


Figura 117: Curva limite per divisori e facciate

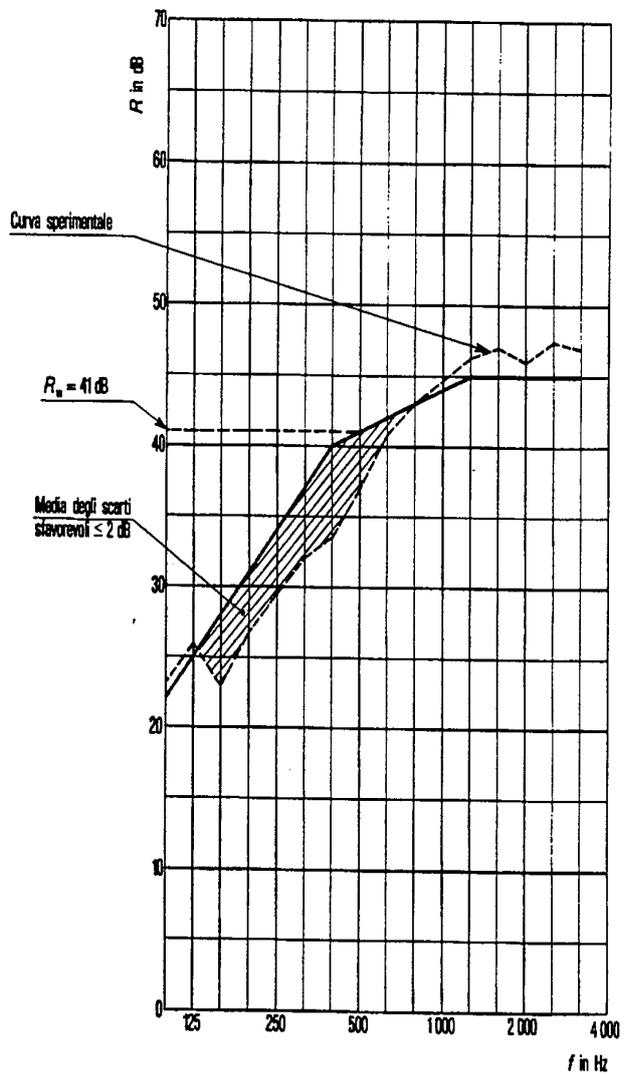


Figura 118: Esempio di determinazione dell'indice di valutazione

Gli strumenti e lo schema di misura è riportato nelle seguenti figure.



Figura 119: Posizionamento della sorgente sonora e del fonometro

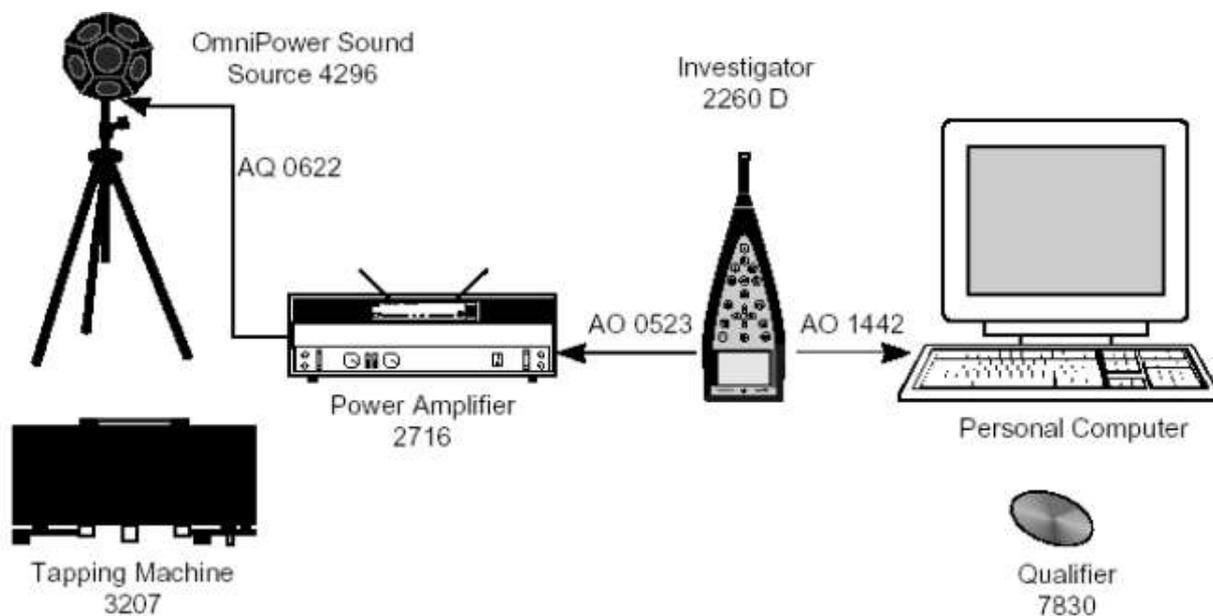


Figura 120: Layout dello schema di misura

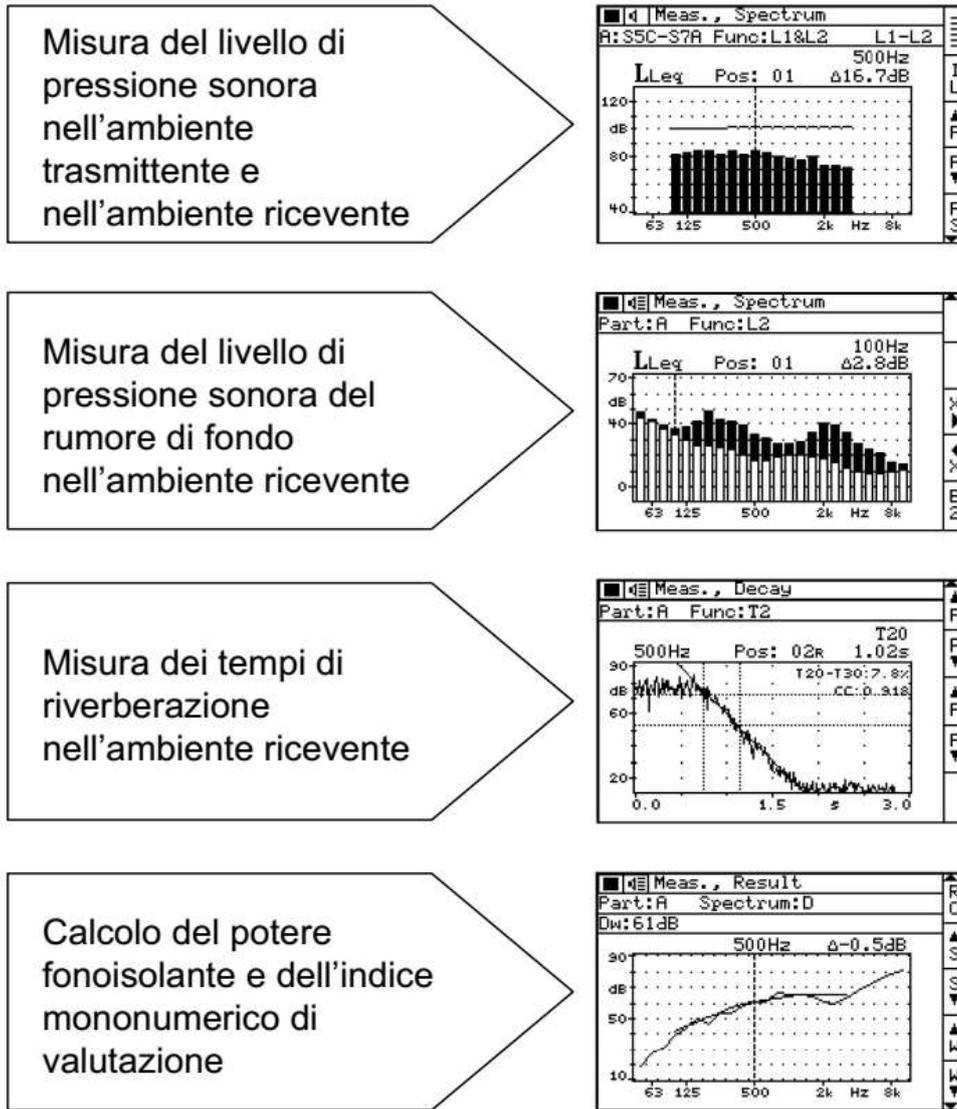


Figura 121: Sequenza delle operazioni

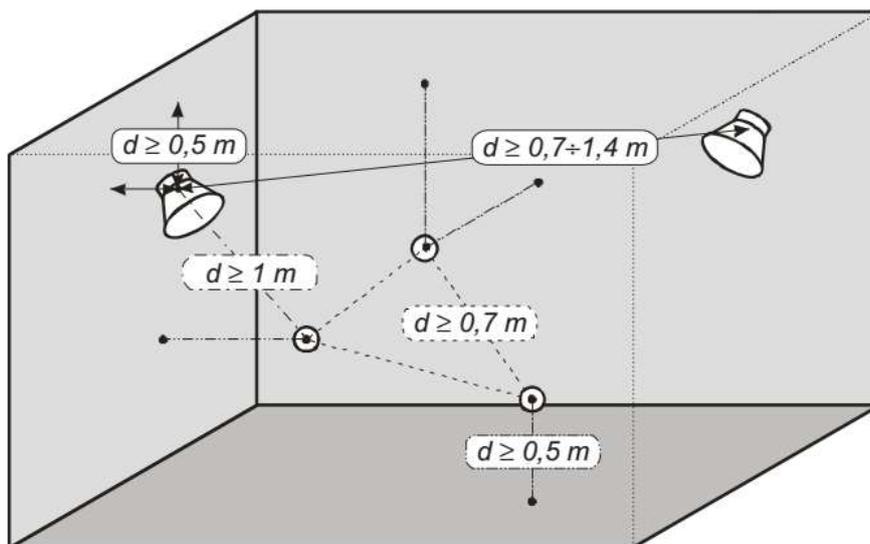


Figura 122: Posizioni di misura per il potere fono isolante

- *Minimo 2 posizioni della sorgente e 5 dei microfoni fissi per la determinazione dei livelli.*
- *Minimo 1 posizione della sorgente e 3 dei microfoni fissi con due ripetizioni per la determinazione dei tempi di riverberazione.*
- *Almeno 2 distinte misure del rumore di fondo.*

Figura 123: Requisiti per le posizioni di misura

### 11.2.9. LIVELLO RUMORE DI CALPESTIO DI SOLAI NORMALIZZATO: $L'_{nw}$

L'indice di livello di rumore di calpestio ( $L'_{nw}$ ) caratterizza la capacità di un solaio di abbattere i rumori impattivi. Si valuta azionando una macchina per il calpestio sul solaio da analizzare e misurando il livello di rumore percepito nell'ambiente disturbato (in genere l'ambiente sottostante). Di conseguenza più basso è il livello di rumore misurato migliori sono le prestazioni di isolamento del solaio.

### 11.2.10. LIVELLO DI RUMORE DEGLI IMPIANTI A FUNZIONAMENTO DISCONTINUO:

$L_{ASMAX}$

Il livello di rumore di impianti a funzionamento discontinuo è caratterizzato dal descrittore livello massimo di pressione sonora ponderata A misurata con costante di tempo slow ( $L_{ASmax}$ ). Si valuta in sostanza misurando il "picco massimo" di rumore emesso da un impianto. Il DPCM considera impianti a funzionamento discontinuo: ascensori, scarichi idraulici, bagni, servizi igienici e rubinetteria.

### 11.2.11. LIVELLO DI RUMORE DEGLI IMPIANTI A FUNZIONAMENTO CONTINUO: $L_{Aeq}$

Il livello di rumore di impianti a funzionamento continuo è definito dal descrittore livello equivalente di pressione sonora ponderata A ( $L_{Aeq}$ ). Si valuta misurando il "livello costante" di rumore emesso dall'impianto. Il DPCM considera impianti a funzionamento continuo gli impianti di riscaldamento, aerazione e condizionamento.

### 11.2.12. ISOLAMENTO ACUSTICO

L'isolamento acustico è un'altra grandezza atta a caratterizzare il grado di protezione dal rumore offerto da un componente edile nei confronti di una sorgente sonora posta al di là di questo. Detti allora  $L_1$  ed  $L_2$  i livelli di pressione sonora misurati rispettivamente nell'ambiente disturbante e disturbato, si definisce isolamento acustico la differenza:

$$D = L_1 - L_2. \quad [88]$$

Tale grandezza non è tuttavia perfetta nel caratterizzare il detto componente in forma assoluta, in quanto dipende ancora dalle caratteristiche acustiche dell'ambiente disturbato.

Al fine di risolvere questa dipendenza, e quindi permettere confronti tra divisori, si può pensare di riferire l'isolamento acustico a un ambiente ricevente fittizio avente un valore di

assorbimento acustico convenzionalmente prefissato  $A_o = 10\text{m}^2$ ; il tutto a parità di potere fonoisolante  $R$  e di superficie  $S_d$  del divisorio che separa i due ambienti reali. Si ha pertanto:

$$R = \underbrace{L_1 - L_2 + 10\log \frac{S_d}{A}}_{\text{Ambiente reale}} = \underbrace{(L_1 - L_2)_n + 10\log \frac{S_d}{A_o}}_{\text{Ambiente fittizio}}$$

da cui :

$$D_n = (L_1 - L_2)_n = L_1 - L_2 + 10\log \frac{A_o}{A} \quad [89]$$

$D_n$  viene ad assumere il nome di “isolamento acustico normalizzato”. Dalla formula di Sabine si ricava per  $D_n$  una forma più utile per la pratica e cioè:

$$D_n = L_1 - L_2 + 10\log \frac{T}{T_o} \quad (T_o = 0.5\text{ s})$$

L’ambiente di riferimento è caratterizzato da un tempo convenzionale di riverberazione  $T_o=0.5$  secondi. Il DPCM 5.12.97 adotta questa grandezza per valutare l’isolamento acustico delle facciate degli edifici. La formula che impone è la seguente:

$$D_{2m,n,T} = L_{1,2m} - L_2 + 10\log \frac{T}{T_o} \quad [90]$$

Qui  $L_{1,2m}$  è il livello di pressione sonora prodotto dal traffico veicolare e misurato a 2m dalla facciata<sup>13</sup>.  $T$  è il tempo di riverberazione dell’ambiente ricevente,  $T_o=0.5$  s è il tempo di riverberazione convenzionale e  $L_2$  è il livello di pressione sonora dell’ambiente disturbato.

Quest’ultimo va calcolato sulla base della seguente formula:

$$L_2 = 10\log \left( \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n 10^{L_k/10} \right) \quad [91]$$

dove  $n$  è l’intero immediatamente superiore ad un decimo del volume ambiente  $V$  ( $\text{m}^3$ ) e comunque non inferiore a 5; in formule:  $n = \frac{V}{10} \geq 5$ . Le misure di livello vanno eseguite in terze d’ottava.

Finalmente dalla curva dell’isolamento acustico normalizzato per le facciate si può ricavare l’indice di valutazione.

A questo scopo il DPCM 5.12.97 e Norma Uni 8720/7 ivi richiamata, prescrivono che ciò si faccia con la stessa curva limite adottata per i divisori e con le stesse procedure di calcolo.

### 11.2.13. CONSIDERAZIONI SUI DESCRITTORI ACUSTICI

I limiti di  $R'w$  sono valori minimi consentiti e riguardano solo “**elementi di separazione tra due distinte unità immobiliari**”. Pertanto non vi sono specifiche prescrizioni per le pareti tra aule scolastiche, camere d’albergo, camere d’ospedale, uffici o per le pareti tra appartamento e vano scala comune.

I limiti  $D_{2m,nT,w}$  sono valori minimi consentiti, riguardano i singoli ambienti abitativi (non l’intera facciata della U.I.) e non dipendono dal rumore esterno all’edificio (qualsiasi residenza in Italia deve possedere un isolamento di facciata pari almeno a 40 dB). Nel caso l’immobile venga edificato in prossimità di opere rumorose la L.447/1995 richiede di realizzare una valutazione di

13

oppure da altoparlante con incidenza del suono a 45° sulla facciata.

“clima acustico” dell’area. Tale valutazione ha lo scopo di analizzare i livelli di rumore ambientale e, se necessario, prescrivere adeguati interventi di mitigazione dei rumori quali, ad esempio, isolamenti di facciata superiori ai limiti definiti nel DPCM. Per definire l’entità dell’isolamento possono essere utilizzate le prescrizioni riportate negli artt. 4 e 5 del DPR 18/11/1998, n. 459 (traffico ferroviario) e l’art. 6 del DPR 30/03/2004, n. 142 (traffico veicolare) che indicano i seguenti valori massimi di livello sonoro da misurarsi a centro della stanza, a finestre chiuse, all’altezza di 1,5 metri dal pavimento:

- 35 dB(A) Leq notturno (ospedali, case di cura e di riposo)
- 40 dB(A) Leq notturno (tutti gli altri ricettori)
- 45 dB(A) Leq diurno (scuole)

Altre indicazioni sui livelli di rumori accettabili all’interno di ambienti abitativi sono riportati nella norma tecnica UNI 8199.

I limiti di  $L'_{nw}$  sono valori massimi consentiti. Il DPCM non chiarisce se la prescrizione è riferita ai solai “a soffitto” o ai solai “a pavimento” degli ambienti abitativi esaminati. Pertanto in caso di edifici a destinazione d’uso mista (ad esempio uffici a piano terra e residenze a piano primo) non è chiaro quali limiti si debbano applicare. Si suggerisce di adottare sempre i valori più restrittivi. Si segnala però che ragionevolmente i limiti del DPCM possono avere senso solo se si considera il solaio “a pavimento” dell’ambiente in esame. Ad esempio è ragionevole che il “pavimento” di un ambiente destinato ad uffici ( $L_{nw} = 55$  dB) debba avere un limite di calpestio più restrittivo del “pavimento” di un ambiente destinato a residenza ( $L'_{nw} = 63$  dB) (in un ufficio le persone “camminano di più” che in una residenza ...).

Il Decreto non specifica che la macchina da calpestio debba essere posizionata in una unità immobiliare differente rispetto a quella dell’ambiente disturbato. Pertanto è possibile eseguire rilevazioni di calpestio anche all’interno della medesima unità immobiliare. La prescrizione è più che ragionevole se si considerano scuole, ospedali, alberghi o uffici. D’altro canto si segnala che realizzare misure di livello di calpestio tra stanze di una unità immobiliare residenziale può risultare, in alcuni casi, particolarmente complicato. Gli ambienti infatti possono essere tra loro collegati da vani scale o altri “ponti acustici”.

Il Decreto non specifica che la sorgente di calpestio debba essere posizionata nell’ambiente soprastante all’ambiente di misura. E quindi possibile realizzare anche rilevazioni tra stanze adiacenti sullo stesso piano o ambienti sfalsati.

Non vi sono specifiche indicazioni nel Decreto in merito al calpestio proveniente dalle scale comuni.

I limiti di  $L_{ASmax}$  e  $L_{Aeq}$  sono valori massimi consentiti, il disturbo deve essere misurato in ambienti diversi da quello in cui il rumore si origina ed è possibile eseguire rilievi anche all’interno della medesima unità immobiliare. Anche in questo caso quest’ultima indicazione è più che ragionevole se si considerano scuole, ospedali, alberghi o uffici, ma più difficile da realizzare per due ambienti interni a una residenza.

Si evidenzia che anche la misura su impianti a funzionamento continuo deve essere eseguita in ambienti diversi da quello in cui il rumore si origina. Pertanto, ad esempio, il rumore di un fan-coil a servizio di una camera d’albergo deve essere misurato nella camera adiacente.

I limiti di rumore degli impianti a funzionamento continuo non sono chiari. Poco sopra alla tabella il DPCM indica che il livello  $L_{Aeq}$  degli impianti a funzionamento continuo non deve superare 25 dB(A) indipendentemente dalla destinazione d’uso degli ambienti considerati. In merito a quali valori vadano applicati sono stati espressi pareri discordanti su due circolari ministeriali:

- Il Ministero dell'Ambiente in una circolare del 9/03/1999 sembra far riferimento ai valori riportati nel paragrafo suddetto.
- Il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici in una circolare del 27/05/2003 fa riferimento ai valori riportati in tabella.

### 11.3. VERIFICHE DI LEGGE PER DIVISORI E FACCIAE

Si riportano le procedure di verifica degli indici richiesti per i requisiti minimi.

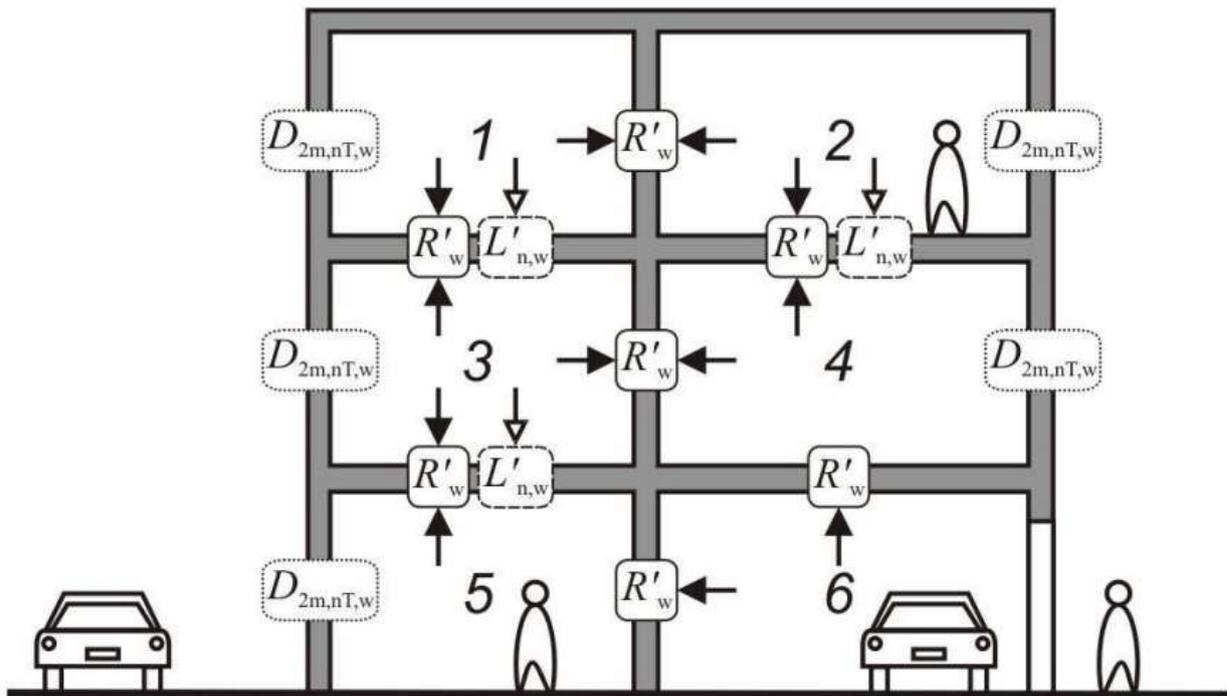


Figura 124: Misure da effettuare per la verifica dei requisiti minimi passivi

#### 11.3.1. VERIFICA DEI DIVISORI

Il procedimento da seguire è il seguente:

1. Predisporre il rumore bianco nell'ambiente 1
2. Misurare  $L_1$  ed  $L_2$  in almeno tre posizioni casuali ma a distanza  $d > 1$  m dalle pareti
3. Se la differenza tra il livello misurato e quello di fondo in una qualsiasi frequenza è superiore a 10 dB, correggere le misure ottenute secondo i valori della Tabella 26 (da UNI 8270/4)
4. Eseguire la misura del  $T_{60}$  nell'ambiente disturbato
5. Calcolare: 
$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S_d}{0.16V/T_{60}}$$
6. Eseguire la procedura grafica per la determinazione dell'Indice di valutazione  $R_w$  con la curva limite in Figura 117.
7. Confrontare il valore  $R_w$  così ottenuto con quello di legge (in Tabella 25).

### 11.3.2. VERIFICA DELLE FACCIATE

Il procedimento da seguire è il seguente:

1. Eseguire la misura del rumore da traffico veicolare  $L_{1,2m}$
2. Valutare  $L_2 = 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n 10^{L_k/10} \right)$  ed eseguire la misura del  $T_{60}$  nell'ambiente disturbato
3. Calcolare l'isolamento acustico normalizzato di facciata dalla formula:  

$$D_{2m,n,T} = L_{1,2m} - L_2 + 10 \log \frac{T_{60}}{T_o}$$
 Eseguire la procedura grafica per la determinazione dell'Indice di valutazione  $D_{2m,n,T,w}$  con curva limite in Figura 117.
4. Confrontare il valore  $D_{2m,n,T,w}$  così ottenuto con quello di legge (Tabella 25).

Differenza tra il livello misurato con la sorgente sonora in funzione e il rumore di fondo. (dB)	Quantità da sottrarre al livello misurato con la sorgente sonora in funzione. (dB)
3	3
Da 4 a 5	2
Da 6 a 9	1

Tabella 26: : Correzione dei livelli in funzione del rumore di fondo

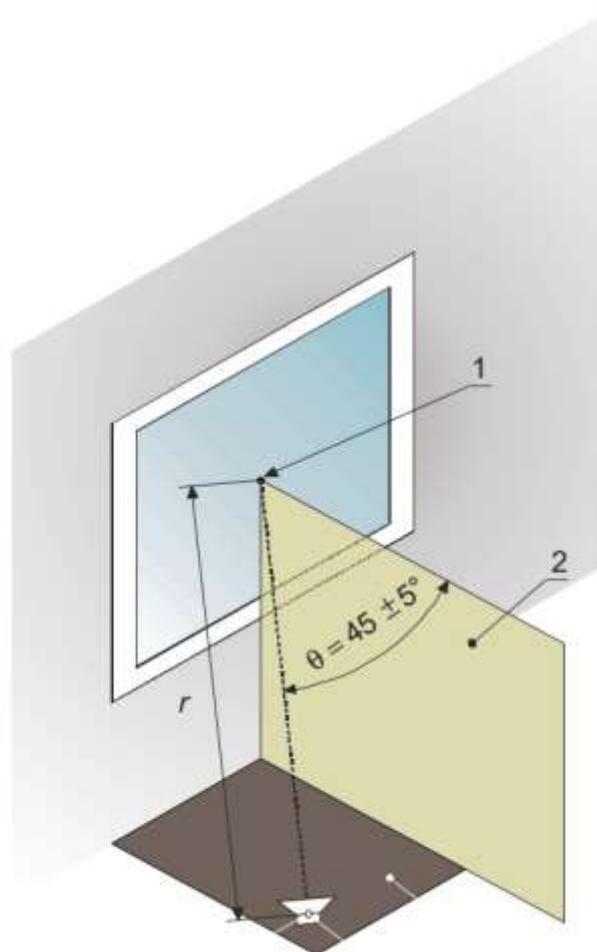


Figura 125: Posizioni di misura delle prestazioni acustiche di facciata

### 11.3.3. VERIFICA DAL RUMORE DA CALPESTIO

Il rumore da calpestio è quello che si trasmette attraverso i solai. Per simulare in maniera convenzionale il rumore nell'ambiente ricevente, si utilizza una macchina particolare, detta *generatore di calpestio normalizzato*, le cui caratteristiche sono precisate nella Norma<sup>14</sup> UNI ISO 10140.

Qui si prescrive che tale macchina sia costituita da una serie di cinque martelletti, del peso di 500 g ciascuno, disposti in linea ed equidistanti che cadono sequenzialmente da un'altezza di 40 cm (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**)<sup>15</sup> con una frequenza di 10 impatti al secondo.

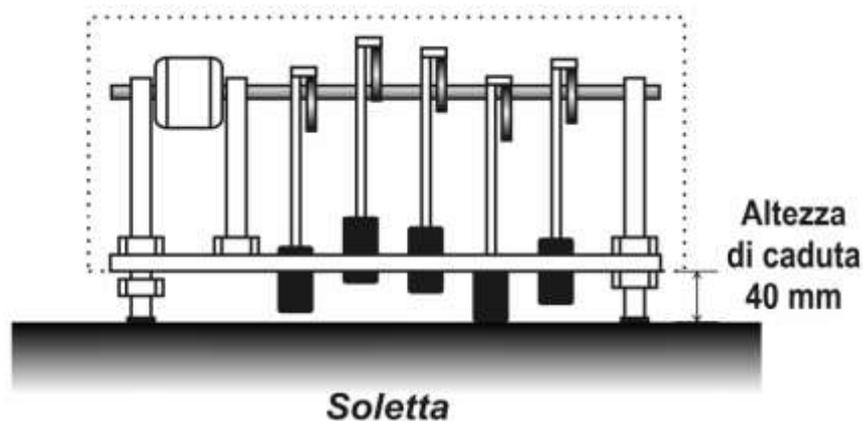


Figura 126: Macchina normalizzata di Calpestio - Sezione

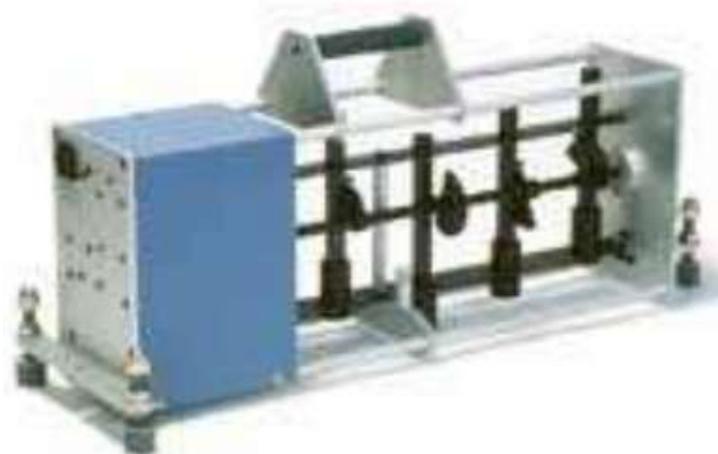


Figura 127: Macchina normalizzata di calpestio

La grandezza cui si fa riferimento per caratterizzare la capacità isolante ai suoni impattivi è il livello di pressione sonora misurato nell'ambiente disturbato (sottostante al solaio su cui agisce il generatore di calpestio). Al solito, per rendere questa grandezza indipendente dalle caratteristiche

<sup>14</sup> La Norma UNI 8270/4 a sua volta riflette la ISO 170/4,

<sup>15</sup> Si richiede inoltre che i martelletti abbiano ciascuno una superficie d'impatto di 7 cm<sup>2</sup> e realizzino 10 impatti al secondo. La parte di martello che colpisce il pavimento deve essere un cilindro d'acciaio di 30 mm di diametro, con una terminazione sferica di 500 mm di raggio. La distanza tra la linea congiungente i martelli e i supporti al suolo deve essere di almeno 100 mm

acustiche del locale ricevente, si può ragionare come nel caso dei divisori, ossia a parità di  $R$  e  $S_d$ , e giungere alla relazione :

$$L_n = L_2 - \log \frac{T}{T_0}$$

sempre con  $T_0 = 0.5$  s. In questa forma  $L_n$  prende il nome di “Livello normalizzato del rumore di calpestio”. Ai fini della misura di  $L_2$  la stessa Norma UNI 8270/4 raccomanda che la macchina sia posta in almeno quattro posizioni diverse sul pavimento dell’ambiente d’emissione, con una distanza minima tra questa e i bordi del pavimento maggiore di 0.5 m.

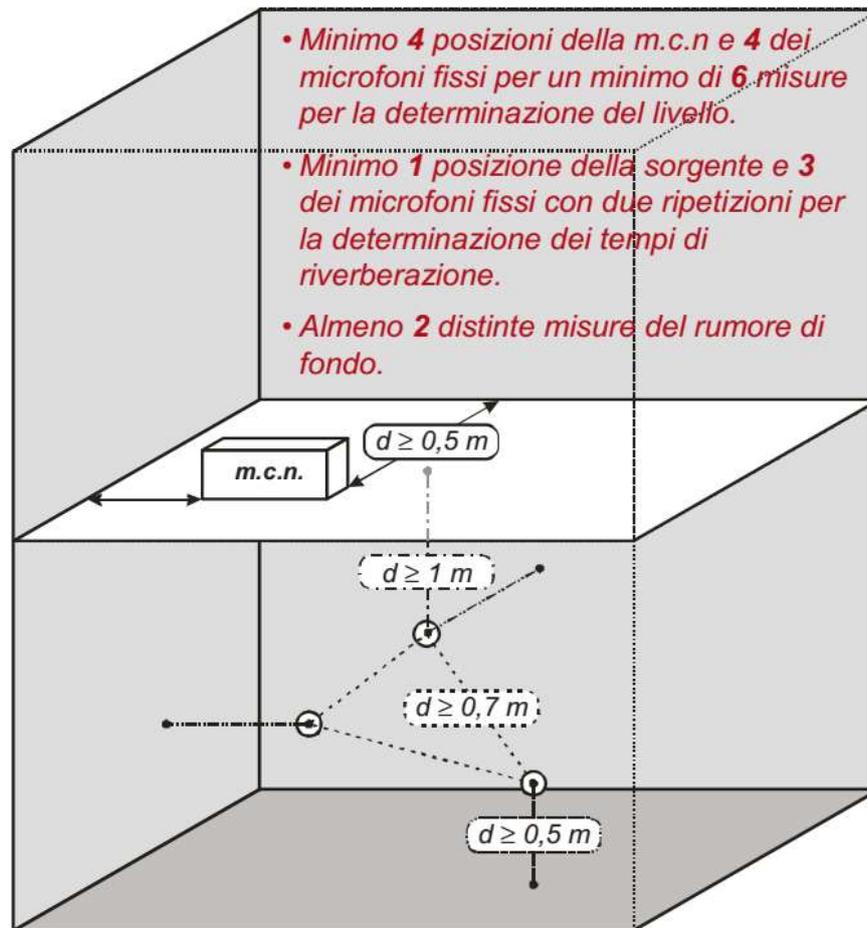


Figura 128: Posizioni di misura per il livello di calpestio

Nel caso di strutture portanti non omogenee (solai nervati, misti etc.) la linea congiungente i martelli deve essere orientata a  $45^\circ$  rispetto all’asse delle travi<sup>16</sup>.

<sup>16</sup>

Resta ancora da segnalare che la UNI 8270/8, sebbene specificatamente prevista per la misura in laboratorio del rumore di calpestio, al §7.2 prescrive che “se in una banda di frequenza qualsiasi il livello di pressione sonora nel locale di ricezione è minore di oltre 10 dB del livello di rumore di fondo, si deve misurare quest’ultimo appena prima e appena dopo la determinazione del livello di pressione sonora in esame, applicando una correzione secondo quanto specificato nella Tab. 7”.

### 11.3.4. INDICE DI VALUTAZIONE DEL LIVELLO DI CALPESTIO

Per ricavare l'indice di valutazione  $L_{n,w}$  corrispondente al livello di calpestio normalizzato  $L_n$ , si opera analogamente a quanto visto per i divisori, ma adottando la curva limite in Figura 129.

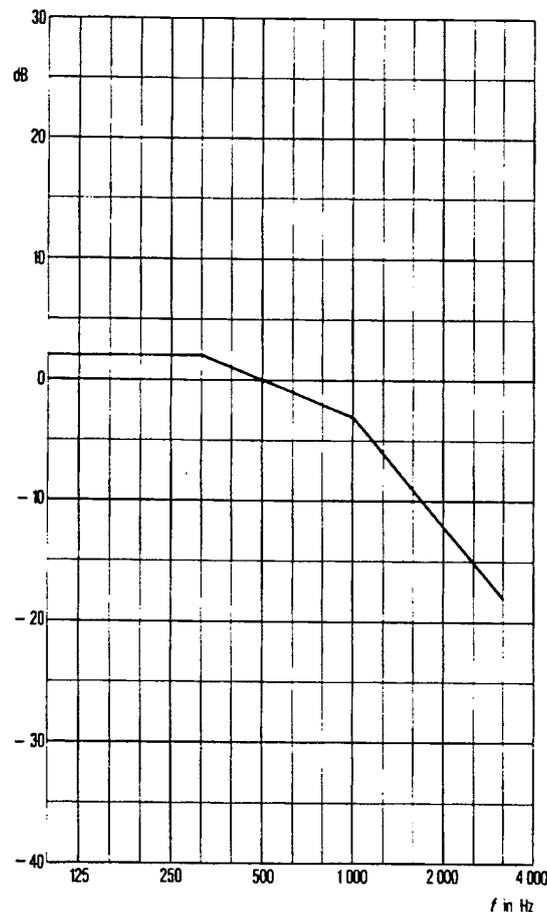


Figura 129: Curva limite per i solai

La condizione di accordo tra le due curve è sempre quella per cui la media degli scostamenti sfavorevoli sia inferiore a 2 dB. In questo caso lo scostamento è "sfavorevole" quando la curva sperimentale sovrasta la curva limite (Figura 130).

La Norma UNI 8270/7 prescrive a questo punto che, una volta determinato  $L_{n,w}$ , ai fini delle verifiche di legge, questo valore sia assunto tal quale se ottenuto da misure in terze d'ottava, mentre sia diminuito di 5 dB se ottenuto da misure in banda d'ottava<sup>17</sup>.

<sup>17</sup>

A chiarimento, si riporta quanto detto nella Nota al §5.2 della UNI 8270/7: "A differenza delle altre grandezze considerate in questa norma, che derivano da differenze di livelli, il valore di  $L_n$  rappresenta in assoluto un livello di pressione sonora e dipende dalla larghezza di banda del filtro utilizzato per l'analisi. In conformità alla ISO 717 e norme analoghe di altri Paesi, il calcolo dell'indice di valutazione viene effettuato sulla base di risultati ottenuti da analisi per bande di 1/3 d'ottava. D'altra parte le analisi per bande d'ottava sono largamente adottate anche in acustica edilizia, soprattutto per le misure in opera e sono previste sia norme nazionali (8270/4) che internazionali (ISO 140/7). Al fine di evitare errori di giudizio in eventuali confronti tra i risultati ottenuti con metodi d'analisi diversi, si ritiene opportuno normalizzare gli indici di valutazione ricavati da curve per bande d'ottava, riportandoli al valore che si otterrebbe, per lo stesso fenomeno in esame, da una curva per bande di 1/3 d'ottava (-5dB=10log(1/3))".

### 11.3.5. VERIFICHE DI LEGGE PER I SOLAI: RIFERIMENTO UNI 8270 & UNI 8270 & UNI 8270

1. Eseguire la misura del rumore di fondo nell'ambiente disturbato.
2. Attivare il generatore di calpestio normalizzato nell'ambiente disturbante
3. Misurare  $L_2$  nell'ambiente disturbato
4. Eseguire i controlli sulla differenza tra livello misurato e rumore di fondo e, se del caso, applicare le correzioni di cui alla Tabella 26
5. Misurare il tempo di riverberazione  $T$  nell'ambiente disturbato.

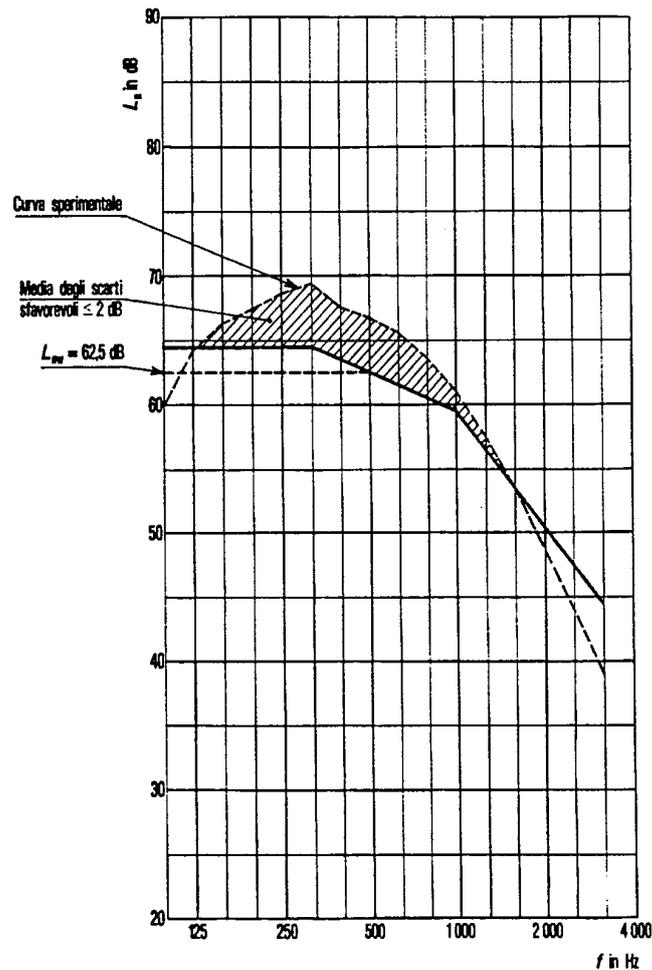


Figura 130: Esempio di determinazione dell'indice di valutazione

$$L_n = L_2 - \log \frac{T}{T_0}$$

6. Calcolare il livello del rumore di calpestio normalizzato:
7. Determinare l'Indice di valutazione  $L_{n,w}$  con l'ausilio della curva limite in Figura 129
8. Confrontare il valore  $L_{n,w}$  così ottenuto con quello di legge (Figura 40).

### 11.3.6. RIFERIMENTI ALLA PRECEDENTE LEGISLAZIONE

Agli addetti ai lavori non sarà certo sfuggito che l'attuale normativa riflette da vicino una certa pregressa legislazione.

Il riferimento alle curve limite per divisori, facciate e solai, l'adozione dell'indice di valutazione quale descrittore delle caratteristiche acustiche dei componenti edili, e procedure di rilevazione e calcolo del tutto simili a quelle qui illustrate, si trovano già nei seguenti testi di legge:

1. Circolare Ministero Lavori Pubblici No. 1769 del 30.4.1966: "Requisiti acustici nelle costruzioni edilizie"
2. Circolare Ministero Lavori Pubblici No. 3150 del 22.5.1967: "Criteri di valutazione e collaudo dei requisiti acustici degli edifici"
3. D.M. 18.12.1975 Cap. 5.1 "Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica"

### 11.3.7. IL RUMORE PRODOTTO DAGLI IMPIANTI TECNOLOGICI

Per completare l'esame del DPCM 5.12.97, resta da trattare il problema del rumore generato dagli impianti tecnologici del quale si parlerà ampiamente nel prossimo capitolo.

Nel testo si prospetta la seguente suddivisione:

#### 1. Servizi a funzionamento discontinuo:

Ascensori  
 Scarichi idraulici  
 Bagni e servizi igienici  
 Rubinetteria

#### 2. Servizi a funzionamento continuo:

Impianti di riscaldamento  
 Impianti di condizionamento  
 Impianti di aerazione

Le prescrizioni sul rumore sono dati in termini di

$L_{Aeq}$  : Livello equivalente continuo ponderato in scala A

$L_{ASmax}$  : Valor massimo del livello equivalente continuo ponderato in scala A con costante di tempo "Slow"

Il rumore risulta ammissibile se:

- $L_{Aeq} < 35 \text{ dB(A)}$  per gli impianti a funzionamento discontinuo
- $L_{ASmax} < 25 \text{ dB(A)}$  per gli impianti a funzionamento continuo

La legge prescrive infine che:

- le misure siano eseguite nell'ambiente nel quale il livello di rumore è più elevato
- tale ambiente deve essere diverso da quello in cui il rumore si origina.

Qui occorre fare un'ultima osservazione. Gli stessi parametri  $L_{Aeq}$  ed  $L_{ASmax}$  sono citati assieme agli altri valori limite nella Tabella 25.

Ma mentre il limite per il livello  $L_{ASmax}$  è 35 dB(A) per tutte le categorie di edifici (trovandosi in ciò conferma che questo valore dipende dall'impianto e non all'edificio), il limite per  $L_{Aeq}$  è, a seconda dei casi ora 25 dB(A), ora 35 dB(A), contraddicendo il carattere assoluto della precedente posizione.

## 11.4. CONSIDERAZIONI SUI REQUISITI ACUSTICI DEGLI EDIFICI

Di punti critici, questioni sospese, nodi irrisolti in questo apparato tecnico-legislativo ce ne sono dunque parecchi. Cosa del resto comprensibile, se si pensa alla vastità e alla complessità del settore che il Legislatore si propone di regolamentare.

A mio avviso, gli elementi veramente problematici sono due:

- 1) il limite eccezionalmente basso per il rumore emesso dagli impianti tecnologici; il che mette fuori legge la totalità degli impianti esistenti e rende di fatto inapplicabile il decreto per quelli di nuova realizzazione.
- 2) il criterio seguito per la compilazione della Tabella 25 sui valori limiti dell'isolamento acustico dei componenti edili, in relazione alla destinazione d'uso degli edifici, nella forma attuale, appare incomprensibile, se non contraddittorio. Una benevola ipotesi è quella dell'errore di stampa...

Ma allora c'è da chiedersi, a quando le correzioni?

La difficoltà nasce dal fatto che trattasi di un testo di legge e non di una norma tecnica, di per sé emendabile per vie più rapide. Ciò di cui si sente il bisogno è in effetti un "Testo Unico", dove tutto sia armonizzato e coerente, oppure un corredo sistematico e organico di *Norme UNI*, più rapide a formularsi e ad aggiornarsi di un testo di legge.

Notizie attendibili riferiscono che è in questa direzione che si sta pensando e forse già lavorando.

Resta un problema di fondo: queste leggi si applicano ai nuovi edifici, al più a quelli in via di ristrutturazione. E il parco edilizio esistente?

Si sa. Finché si opera sul nuovo, si raccoglierà poco. In fatto di interventi legislativi sugli edifici l'Italia ha avuto un'esperienza parallela con le leggi sul risparmio energetico (ex Legge 373 e ora Legge 10): i benefici sono stati modestissimi. Tra i tanti motivi, cito il fondamentale: il parco edilizio italiano, ormai da parecchio tempo, si rinnova meno dell'1% l'anno.

Quindi qualunque intervento sul nuovo è pressoché infruttuoso. Se si vuole realmente incidere sulla realtà, e portare a casa risultati concreti, occorre intervenire sull'esistente. Si tratta naturalmente di trovare il modo giusto.

Riferimento Normativo	Campo di applicazione	Impianto a funzionamento		
		Continuo L <sub>Aeq</sub> dB(A)	Discontinuo L <sub>ASmax</sub> dB(A)	
<b>Legislazione attuale</b>	<b>DPCM 5.12.97</b>	<b>Tutti gli edifici</b>	<b>25</b>	<b>35</b>
Delibera Regione Lombardia(*)	15.12.1977	Edilizia residenziale pubblica	35	40
Delibera Regione Trentino (Bolzano) (*)	Legge Prov. 20.11.78 No.66 DPGP 6.3.89 No.4	Edilizia residenziale pubblica	30	40
Delibera Regione Trentino (Trento) (*)	Legge Prov. 18.3.91, No.6 DPGP 4.8.92 No.12-65/Leg.	Edilizia residenziale pubblica	30	40
Circolare Ministero Lavori Pubblici	No. 1769 30.4.66	Edilizia sovvenzionata	33(**) 36(***)	36(**) 40(***)
Circolare Ministero Lavori Pubblici	No. 3150 22.5.67	Edilizia sovvenzionata	40	50
Decreto Ministeriale	18.12.1975	Edilizia scolastica	40	50

(\*) Citato in G. Elia, G. Geppetti: "Progettazione acustica di edifici civili e industriali" La Nuova Italia Scientifica, 1994

(\*\*): isolamento superiore

(\*\*\*): isolamento normale

*Tabella 27: Comparazione dei limiti di legge per il rumore prodotto dagli impianti tecnologici*

## 11.5. NORMA UNI 11367:2010

Nel mese di **luglio 2010** è stata emanata la norma tecnica **UNI 11367** dal titolo **“Classificazione acustica delle unità immobiliari – Procedura di valutazione e verifica in opera”**. Il documento spiega come determinare la classe acustica di una unità immobiliare esistente sulla base dei risultati di misure fonometriche eseguite sull’edificio. Attualmente la UNI 11367 non è richiamata in alcun documento legislativo.

Pertanto l’applicazione delle classi acustiche è **volontaria**. Il rispetto di una specifica classe acustica diventa obbligatorio solo se previsto dalle condizioni contrattuali.

Di seguito i valori limite delle classi acustiche.

Classe Acustica	Indici di valutazione					Alberghi	
	$D_{2m,nT,w}$ [dB]	$R'_w$ [dB]	$L'_{nw}$ [dB]	$L_{ic}$ [dBA]	$L_{id}$ [dBA]	$D_{nT,w}$ [dB]	$L'_{nw}$ [dB]
I	$\geq 43$	$\geq 56$	$\leq 53$	$\leq 25$	$\leq 30$	$\geq 56$	$\leq 53$
II	$\geq 40$	$\geq 53$	$\leq 58$	$\leq 28$	$\leq 33$	$\geq 53$	$\leq 58$
III	$\geq 37$	$\geq 50$	$\leq 63$	$\leq 32$	$\leq 37$	$\geq 50$	$\leq 63$
IV	$\geq 32$	$\geq 45$	$\leq 68$	$\leq 37$	$\leq 42$	$\geq 45$	$\leq 68$

Tabella 28: Classi Acustiche indicate dalla UNI 11367:2010

Le ultime due colonne a destra indicano i limiti di isolamento ai rumori aerei e al calpestio per le partizioni orizzontali e verticali tra camere d’albergo.

Nel caso vengano rilevate in opera prestazioni peggiori rispetto alla classe IV il requisito risulta *non classificabile* e viene identificato con l’acronimo NC.

Nel caso un descrittore non sia significativo per l’unità immobiliare in esame, ad esempio un appartamento non soggetto a rumori da impianti a funzionamento continuo, si adotta la sigla NP, *“non pertinente”*.

I limiti della tabella sono validi per tutte le destinazioni d’uso ad eccezione di ospedali e scuole. Per queste tipologie di edifici la norma propone nell’Appendice A alcuni valori di riferimento per definire costruzioni con prestazioni acustiche “di base” o “superiori”.

La classificazione acustica prevede di rilevare in opera le caratteristiche di tutte le partizioni e gli impianti significativi per l’unità immobiliare in esame. Le prestazioni delle singole partizioni devono essere “peggiorate”, per tenere in considerazione l’incertezza di misura, utilizzando i coefficienti riportati nella tabella che segue, in modo da ottenere i “valori utili”.

La classe acustica di uno specifico descrittore si ottiene mediando i valori utili pertinenti con le relazioni matematiche indicate di seguito.

$D_{2m,nT,w}$	$R'_w$	$L'_{nw}$	$L_{ic}$	$L_{id}$
-1	-1	+1	+1,1	+2,4

dove:

- $X_i, Y_i$  valore utile di un determinato requisito di uno specifico elemento tecnico/impianto
- $n$  è il numero di elementi tecnici/impianti coinvolti

Dalle classi dei singoli descrittori si ricava la classe acustica globale dell’unità immobiliare associando ad ogni descrittore un coefficiente (cfr. tabella seguente) e calcolando la media aritmetica.

Classe	I	II	III	IV	Prestazioni fino a 5 dB (o dBA) peggiori rispetto alla classe IV	Prestazioni per più di 5 dB (o dBA) peggiori rispetto alla classe IV
<b>Coefficiente</b>	1	2	3	4	5	10

Il valor medio arrotondato all'intero più vicino determina la classe acustica globale.

Nell'attestato di classificazione devono essere riportate, oltre alla classe acustica globale, anche le caratteristiche di tutti i descrittori, come indicato nella tabella che segue.

Unità immobiliare UI ...					
Classe	$D_{2m,nt,w}$	$R'_w$	$L'_{nw}$	$L_{ic}$	$L_{id}$
III	III	II	IV	NP	III

La norma tecnica, all'Appendice L, spiega come interpretare i limiti delle classi. Ipotizzando una normale sensibilità al rumore dei soggetti interessati e livelli sonori disturbanti di media intensità, vengono definite due tabelle che indicano le prestazioni acustiche attese. La prima valida per i rumori interni alle unità immobiliari ( $R'_w$ ,  $L'_{nw}$ ,  $L_{ic}$ ,  $L_{id}$ ), la seconda per l'isolamento acustico di facciata ( $D_{2m,nt,w}$ ).

Classe acustica	Prestazioni acustiche attese ( $R'_w$ , $L'_{nw}$ , $L_{ic}$ , $L_{id}$ )
I	Molto buone
II	Buone
III	Di base
IV	Modeste

Tipologia di area	Classe di isolamento acustico di facciata ( $D_{2m,nt,w}$ )			
	IV	III	II	I
Molto silenziosa	Di base	Buone	Molto buone	Molto buone
Abbastanza silenziosa	Modeste	Di base	Buone	Molto buone
Mediamente rumorosa	Modeste	Modeste	Di base	Buone
Molto rumorosa	Modeste	Modeste	Modeste	Di base

La seconda tabella in particolare correla, seppur molto qualitativamente, l'efficacia dell'isolamento di facciata con il clima acustico esterno.

In sintesi si hanno le seguenti caratteristiche per la UNI 11367:

- quattro classi prestazionali (I, II, III, IV);
- classificazione effettuata esclusivamente sulla base delle prestazioni valutate in opera;
- parametri analoghi a quelli già in uso per il DPCM 5/12/97;
- classificazione dell'unità immobiliare a partire dalle prestazioni degli elementi tecnici che la compongono;
- esclusione di scuole ed ospedali (solo livelli prestazionali di base e superiori);
- classificazione indipendente dalla destinazione d'uso (esclusione di specifiche destinazioni d'uso quando non è rilevante l'esigenza di protezione dal rumore);
- Valutazione delle prestazioni acustiche degli elementi di partizione interna degli alberghi (considerati come un'unica unità immobiliare);
- introduzione dell'incertezza di misura;
- possibilità di effettuare un campionamento degli elementi tecnici per gli edifici seriali (tenendo conto dell'incertezza di campionamento);

- ambienti acusticamente verificabili solo se gli allestimenti di misura sono conformi almeno alle prescrizioni della norma UNI EN ISO 140-14;
- procedura specifica per la determinazione del rumore degli impianti;
- possibilità di valutazione qualitativa anche con parametri alternativi (DnT);
- indicazioni per la valutazione del tempo di riverberazione in relazione alla destinazione d'uso degli ambienti.

Il passaggio dai **requisiti minimi cogenti** alla **classificazione prestazionale** sulla base dei metodi forniti dalla norma UNI 11367 (in analogia a quanto avviene per il risparmio energetico) può rendere più semplice e trasparente la gestione del processo di realizzazione degli immobili, affidando al mercato la definizione del valore finale del bene.

L'emanazione della norma UNI 11367 fornisce gli strumenti operativi di verifica in opera necessari per la completa revisione del DPCM 5/12/97.

## 11.6. NORMA UNI 12354

Reca norme su "Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti".

E suddivisa in 6 parti:

- Parte 1: Isolamento dal rumore per via aerea tra ambienti
- Parte 2: Isolamento acustico al calpestio tra ambienti
- Parte 3: Isolamento acustico contro il rumore proveniente dall'esterno per via aerea
- Parte 4: Trasmissione del rumore interno all'esterno
- Parte 5: Livelli sonori dovuti agli impianti tecnici
- Parte 6: Assorbimento acustico in ambienti chiusi.

## 11.7. SODDISFACIMENTO DEI REQUISITI ACUSTICI PASSIVI

Per il soddisfacimento dei requisiti acustici passivi degli edifici occorre procedere con attenzione nelle tre fasi di costruzione degli edifici.

### 1. Progettazione:

- a. Analisi delle caratteristiche di isolamento acustico necessarie (destinazione d'uso, tipologia costruttiva, localizzazione degli impianti di servizio all'edificio, ecc.).
- b. Utilizzo di soluzioni costruttive basate su elementi certificati in laboratorio secondo la norma UNI EN ISO 140-3.
- c. Verifica della progettazione mediante i metodi delle norme UNI EN 12354 e UNI/TR 11175;

### 2. Esecuzione:

- a. Rispetto delle prescrizioni progettuali e di capitolato.
- b. Analisi preventiva dell'incidenza delle varianti in corso d'opera sulle prestazioni acustiche.
- c. Controllo accurato della posa in opera.
- d. Correzione in corso d'opera di eventuali "ponti acustici".

### 3. Collaudo: Verifica delle prestazioni

- a. Mediante valutazione in opera del potere fonoisolante apparente, del livello di calpestio e dell'isolamento acustico di facciata secondo le prescrizioni delle norme UNI EN ISO 16283.
- b. Verifica della rumorosità degli impianti a funzionamento continuo e discontinuo (UNI EN ISO 16032, UNI EN ISO 10052).

Le possibili vie di trasmissione laterale dell'energia sonora devono essere valutate in sede di progetto, per evitare "**ponti acustici**" difficilmente correggibili in fase di realizzazione.

Alcune vie di trasmissione laterale devono essere accuratamente evitate, in quanto di difficile correzione, in particolare:

- controsoffitti comunicanti;
- sigillatura perimetrale di partizioni e controsoffitti;
- griglie di ripresa;
- terminali comunicanti fra più ambienti;
- attraversamento di canali d'aria.

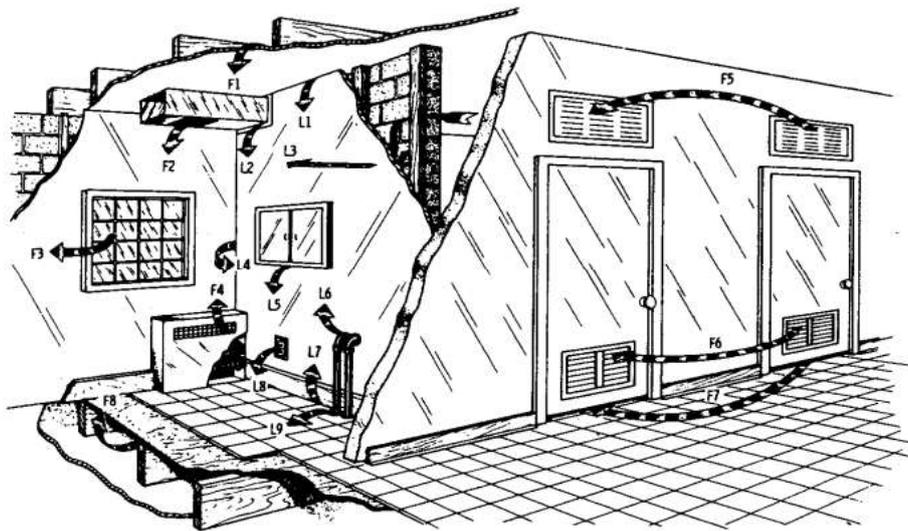


Figura 131: Vie di trasmissione laterale e ponti acustici

### 11.7.1. NECESSITÀ DELLA CULTURA DELLA VERIFICA E DEL CONTROLLO ACUSTICO

La **presa di coscienza** del problema della qualità acustica da parte dei soggetti che operano nel mercato dell'edilizia è necessaria per rendere effettivamente applicabili le attuali tecniche di valutazione e progettazione.

Finché il problema dei requisiti acustici passivi degli edifici verrà vissuto come un problema "*scomodo*", ma comunque trascurabile o dilazionabile nel tempo, non sarà possibile pervenire alla cosiddetta "*progettazione integrata*" del sistema edificio-strutture-impianti, che permette di evitare sul nascere o di limitare la maggior parte dei problemi.

Gli strumenti progettuali in acustica, già disponibili, sono rappresentati dalle norme della serie UNI EN 12354 e dal documento tecnico UNI/TR 11175.

Si ricordi sempre che i problemi di rumorosità vanno risolti prima che si verifichino. Dopo è troppo tardi e quasi sempre la soluzione dei problemi sono impegnativi e traumatici. Così avviene per la progettazione impiantistica che per la progettazione architettonica.

Infine è utile sottolineare come la mancanza della verifica dei requisiti acustici passivi di un edificio determina una svalutazione dell'immobile del 20-30% (vedi sentenza del Tribunale di

Torino) e pertanto si ha spesso una richiesta di danni da parte dei proprietari verso i costruttori e da questi verso i progettisti, qualora essi non abbiano rispettato le norme sopra indicate.

Inoltre i costruttori, così come avviene per tutto ciò che essi costruiscono (vedasi per il cemento armato, per gli impianti, ...) sono responsabili diretti di quanto realizzato in difformità alle norme acustiche e pertanto sempre più spesso si assiste a richieste di revisioni progettuali e varianti di progetto nel caso essi si accorgano che i requisiti acustici passivi non sono stati presi in considerazione nella progettazione edilizia.

La contrazione del mercato immobiliare e le ridotte capacità di investimento portano gli acquirenti ad una maggiore attenzione, in particolare verso i requisiti tecnici che maggiormente possono incidere sul valore del bene.

Le tendenze attuali nella gestione dei contenziosi derivanti dalla mancata verifica dei requisiti acustici passivi sono orientate verso:

- la sospensione dell'abitabilità fino al ripristino (procedimento amministrativo);
- la risoluzione dei contratti di acquisto (contenzioso civile).

### 11.7.2. LA FIGURA DEL TECNICO COMPETENTE

Le misure acustiche debbono essere effettuate da un tecnico iscritto nell'Albo Regionale dei Tecnici Competenti in Acustica. Il percorso che egli deve effettuare per le misure dei requisiti acustici passivi sono riportati nella figura seguente.

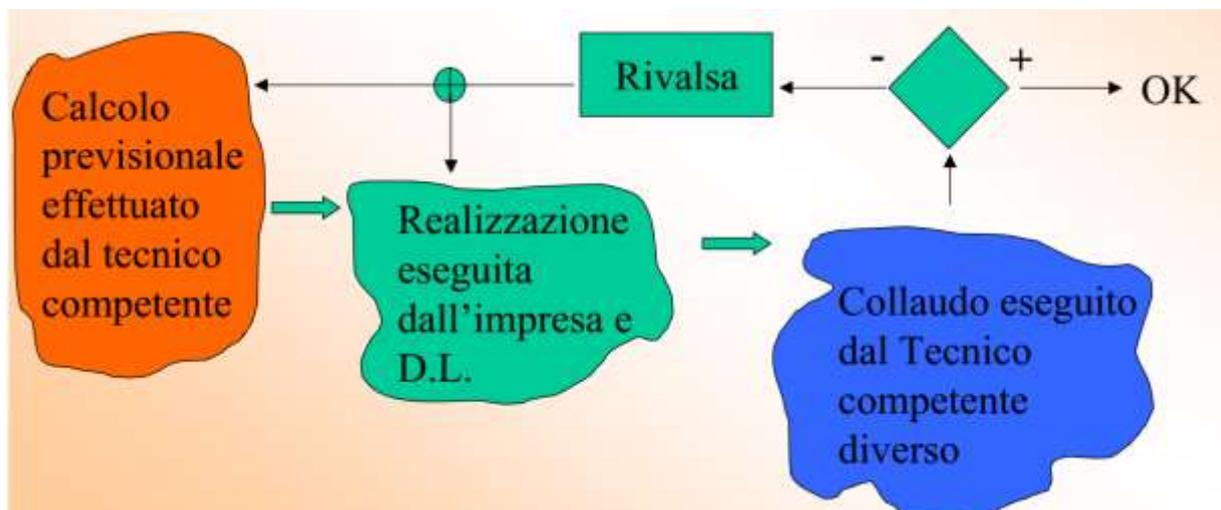


Figura 132: Percorso operativo del Tecnico Competente

Le competenze del Tecnico Competente sono qui sintetizzate:

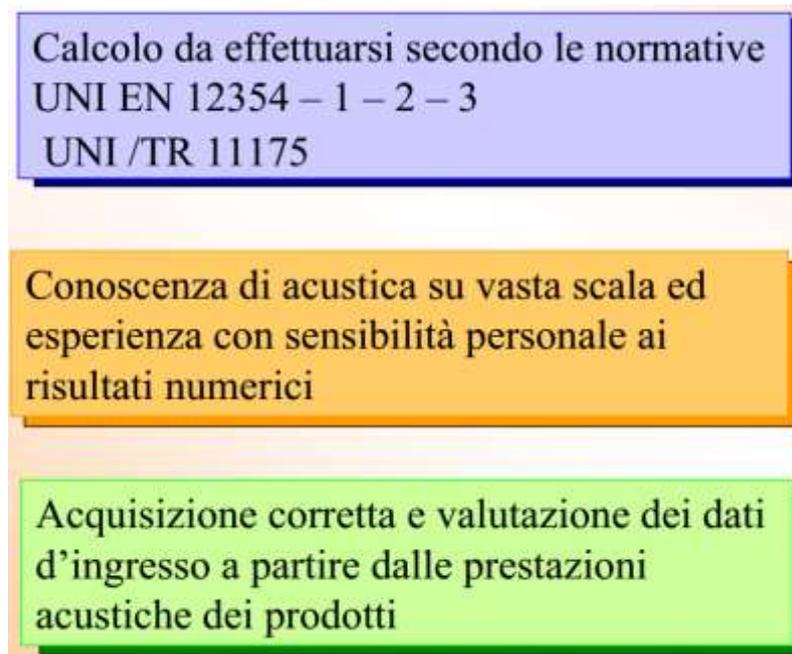


Figura 133: Competenze del Tecnico Competente

### 11.7.3. ISOLAMENTO ACUSTICO IN PARALLELO

Nel caso di parallelo dell'isolamento acustico si può utilizzare l'abaco di figura seguente con il quale si può calcolare la riduzione delle prestazioni del componente con maggiore potere fonoisolante.

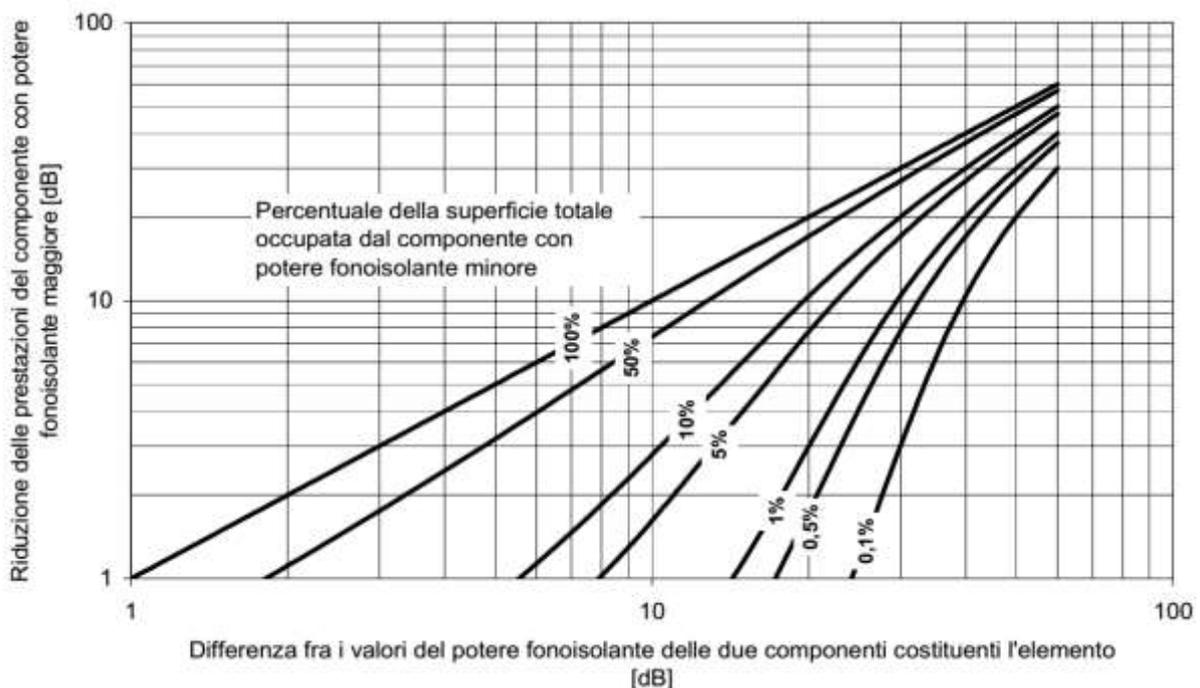


Figura 134: Isolamento in parallelo

Vale la relazione:

$$R_w = -10 \text{Log} \left[ \frac{1}{S} \sum_{i=1}^n S_i 10^{\left( \frac{R_{w,i}}{10} \right)} \right]$$

Il soddisfacimento dei requisiti acustici passivi non implica la garanzia di condizioni di comfort acustico in qualsiasi situazione.

I metodi di quantificazione delle prestazioni in opera degli elementi edilizi non sono direttamente correlabili ai parametri descrittivi di disturbo indotto all'interno degli ambienti abitativi.

Differenti parametri di valutazione implicano differenti "tipologie" di prestazione, anche a parità di valori numerici degli indici di valutazione.

La percezione sensoriale degli utenti di un ambiente abitativo è orientata alla differenza di livello sonoro e non al poter fonoisolante (apparente).

Nel caso di valutazione del disturbo indotto in ambienti adiacenti, i parametri previsti dal DPCM 5/12/97 possono risultare non adeguati allo scopo.

A parità di livello di pressione sonora negli ambienti adiacenti trasmettenti e di potere fonoisolante apparente delle strutture orizzontali e verticali, il livello di pressione sonora differisce di circa 4 dB se si confronta un solaio di 25 m<sup>2</sup> con una parete di 10 m<sup>2</sup>.

#### 11.7.4. COLLAUDO ACUSTICO

Ha notevole importanza la verifica in opera con stretta osservanza dei metodi di prova normati (UNI EN ISO 16283-1:2014 "Acustica - Misure in opera dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 1: Isolamento acustico per via aerea" [sostituisce le norme UNI EN ISO 140 parti 4, 5, 7 e 14], UNI 11569:2015, "Acustica - Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Misurazioni in opera dell'isolamento dal rumore di calpestio di solai", UNI 11572:2015 "Acustica - Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Misurazioni in opera dell'isolamento acustico per via aerea degli elementi di facciata e delle facciate").

C'è la necessità di vaste campagne di misura per valutare la conformità delle soluzioni costruttive (campioni statistici rappresentativi per tipologia di costruzioni).

### 11.8. PREVISIONE DEL POTERE FONISOALNTE

Allo scopo di prevedere, in fase progettuale, il potere fonoisolante dei vari elementi costitutivi di un edificio, si riportano qui le correlazioni più utilizzate in letteratura.

#### 11.8.1. POTERE FONISOALNTE DELLE PARETI

Per frequenze fra 200 e 3200 Hz e per onde normali si può usare la più volte citata *legge di massa*:

$$R = 20 \text{Log} (f \sigma) - 42.5 \quad [92]$$

con  $\sigma$  densità superficiale della parete.

Per campi diffusi (incidenza casuale) si ha:

$$R = R_0 - 10 \text{Log} (0.23 R_0) \quad [93]$$

con  $R_w$  dato dalla [92].

Una relazione sperimentale dell'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferrari (IENGF) valida per tutto il campo di frequenze è la seguente:

$$R_w = 20 \text{Log} \sigma \quad [94]$$

con  $\sigma$  densità superficiale della parete.

Per pareti composte si hanno notevoli complessità di calcolo e in letteratura si hanno varie relazioni per i casi pratici più usuali. Per pareti composte con elementi di diverso potere fonoisolante (ad esempio, porte, finestre, ...) si ha una riduzione del potere fonoisolante totale rispetto ad una parete omogenea. La relazione utilizzata per il calcolo di  $R$  è:

$$R = -10 \text{Log} \left( \frac{1}{S} \sum S_i 10^{-R_i/10} \right) \quad [95]$$

con:

- $S$  superficie totale della parete,  $\text{m}^2$
- $S_i$  superficie del componente *esimo*,  $\text{m}^2$
- $R_i$  potere fonoisolante del componente *i*.esimo, dB.

Con riferimento alla figura seguente si può calcolare il potere fonoisolante apparente,  $R'$ , mediante le seguenti relazioni:

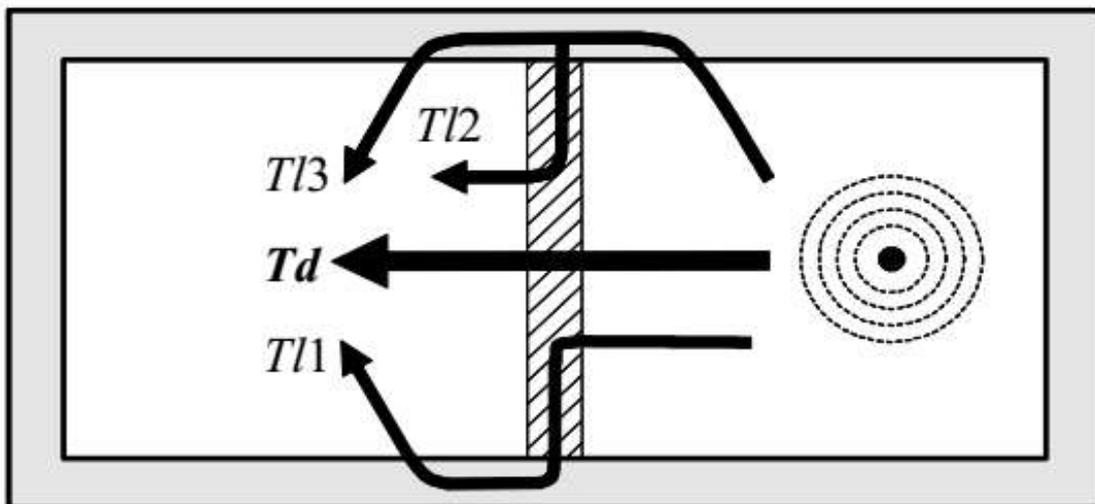


Figura 135: Modello di trasmissione del rumore fra ambienti

Potere fonoisolante della partizione determinato in laboratorio (ISO 140-3)

$$R' = -10 \log \left( 10^{\frac{R_{Td}}{10}} + \sum_{T=1}^n 10^{\frac{R_{T1}}{10}} + \sum_{T=1}^n 10^{\frac{R_{T2}}{10}} + \sum_{T=1}^n 10^{\frac{R_{T3}}{10}} \right)$$

Contributo dei percorsi laterali di trasmissione dell'energia sonora

$$R_{ij} = \frac{R_i + R_j}{2} + \Delta R_{ij} + K_{ij} + 10 \log \frac{S}{l_0 l_{ij}}$$

Potere fonoisolante degli elementi che compongono il giunto

Indice di riduzione delle vibrazioni



Dipende essenzialmente dal tipo di giunto e dalla massa delle strutture che compongono il giunto

Il fattore  $K_{ij}$  viene determinato sulla base della tipologia di giunto. In figura si vedono le varie tipologie di giunto laterale che si possono realizzare nella costruzione dell'intersezione tra la parete di separazione e le pareti laterali.

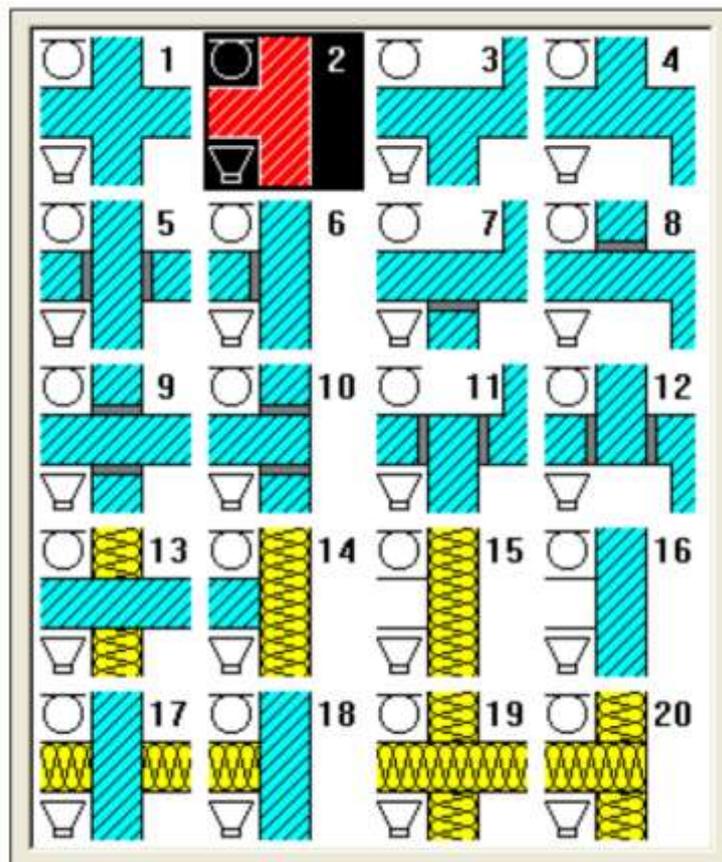


Figura 136: Modello semplificato per i giunti

TIPO DI GIUNZIONE	TIPO DI TRASMISSIONE	K <sub>ij</sub>
Rigida a croce	Diritto	$K_{13} = 8,7 + 17,1M + 5,7 M^2$
	Angolo	$K_{12} = 8,7 + 5,7 M^2$
Rigida a t	Diritto	$K_{13} = 5,7 + 14,1M + 5,7 M^2$
	Angolo	$K_{12} = 5,7 + 5,7 M^2$
Struttura omogenea e facciata leggera	Diritto	$K_{13} = 5 + 10M \quad K_{13} > 5 \text{ dB}$
	Angolo	$K_{12} = 10 + 10 M $
Strutture omogenee con strato desolidarizzante	Diritto su pareti con strato flessibile	$K_{13} = 5,7 + 14,1M + 5,7 M^2 + 12$
	Diritto su parete omogenea	$K_{24} = 3,7 + 14,1M + 5,7M^2 \quad 0 > K_{24} > -4 \text{ dB}$
	Angolo	$K_{12} = 5,7 + 5,7 M^2 + 6$
Struttura omogenea con angolo	Angolo	$K_{12} = 15  M  - 3 \quad K_{12} > -2 \text{ dB}$
Struttura omogenea con cambio di spessore	Diritto	$K_{12} = 5M^2 - 5$
Doppia parete leggera e struttura omogenea	Diritto su parete doppia	$K_{13} = 10 + 20M \quad K_{13} > 10 \text{ dB}$
	Diritto su parete omogenea	$K_{24} = 3 + 14,1M + 5,7 M^2 \text{ m}^2_1/\text{m}^2_2 > 3$
	Angolo	$K_{12} = 10 + 10 M $
Pareti doppie leggere accoppiate	Diritto	$K_{13} = 10 + 20M$
	Angolo	$K_{12} = 10 + 10 M $

Tabella 29: Valori di K<sub>ij</sub>

### 11.8.2. POTERE FONOISOLANTE DEI SERRAMENTI

In genere i serramenti costituiscono il punto debole di una parete. La superficie vetrata si comporta come una superficie omogenea e per essa valgono le relazioni precedenti. I valori sperimentali di R per i vetri sono inferiori a quelli indicata dalla legge di massa [92] e pertanto è più utile utilizzare la relazione sperimentale proposta dall'INGF:

$$R_w = 12 \text{Log} \sigma + 17 \quad [96]$$

Come si vede un raddoppio dello spessore della lastra vetrata porta ad un incremento di 3÷4 dB di R. Nella precedente relazione deve essere  $\sigma < 60 \text{ kg/m}^2$ .

Per aumentare R si possono usare più lastre vetrate purché di spessore maggiore di 4 mm. Per aumenti significativi occorre utilizzare doppi serramenti distanziati di almeno 10 cm e con rivestimento assorbente della superficie perimetrale interna fra le due finestre.

### 11.8.3. PREVISIONE DELL'ISOLAMENTO IMPATTIVO E DI CALPESTIO

Il livello di calpestio dipende dalla costituzione dei solai e delle strutture murarie che trasmettono le vibrazioni nell'ambiente. Per la previsione teorica si possono utilizzare le seguenti relazioni.

#### Solai Omogenei

Supponendo la densità costante e lo spessore uniforme il livello di calpestio (cioè il livello generata dalla *macchina di calpestio*) è dato da:

$$L_n = 10 \text{Log} \left( \frac{4 \rho^2 c_0^2 \sigma_{rad}}{5.1 \rho_p c_L h_p s^3 p_0^2 A_0} \right) \quad [97]$$

con:

- $A_0$  Area equivalente di assorbimento acustico pari a 10 m<sup>2</sup>;
- $\rho$  densità dell'aria, kg/m<sup>3</sup>;
- $c_0$  celerità del suono, m/s;
- $\sigma_{rad}$  efficienza acustica (se  $f > f_c$  allora è pari ad 1);
- $\rho_p$  densità del solaio, kg/m<sup>3</sup>;
- $h_p$  fattore di smorzamento;
- $s$  spessore, m;
- $c_L$  celerità longitudinale del suono, m/s.

Si osservi che  $L_n$  è indipendente dalla frequenza e che raddoppiando lo spessore del solaio si ha un incremento di 9 dB di  $L_n$ . Inoltre per solaio omogeneo si ha una relazione che lega  $R$  ed  $L_n$ :

$$L_n + R = 43 + 30 \text{Log} f - 10 \text{Log}(\sigma_{rad} D_L) \quad [98]$$

ove  $D_L$  è l'effetto di attenuazione del pavimento sopra il solaio ed  $f$  la frequenza di centro banda. Si osservi che le precedenti relazioni, proprio per l'ipotesi di omogeneità del solaio, debbono essere utilizzate con cautela nei calcoli pratici. Nei manuali specializzati si possono trovare relazioni specifiche per le varie tipologie costruttive.

### Pavimento con rivestimento

Agendo sul rivestimento del solaio si può attenuare notevolmente il livello di calpestio. Nella pratica si utilizzano materiali elastici quali il sughero, la gomma, l'asfalto, la moquette, tappeti, ... L'effetto di attenuazione prodotto da questi rivestimenti vale:

$$D_L = 40 \text{Log} \left( \frac{f}{f_0} \right) \quad [99]$$

con  $f_0$  frequenza critica data dalla relazione:

$$f_0 = \frac{1}{2} \pi \sqrt{\frac{A_h E}{mh}} \quad [100]$$

ove:

- $f_0$  frequenza critica o di taglio, Hz;
- $A_h$  area della superficie di percussione dei materiali della macchina di calpestio, pari a 7 cm<sup>2</sup>;
- $m$  massa del martello, 0.5 kg;
- $h$  spessore del rivestimento, m;
- $E$  modulo elastico del rivestimento, N/m<sup>2</sup>.

Alcuni valori usuali di  $D_L$  sono riportati nella seguente tabella.

Materiale	Spessore (mm)	$D_L$ (dB)
Gomma Industriale	4	11.8
	4	12.1
	5	10.6
	5	16.8
Piastrelle Viniliche	2	3.7

	2.5	8.3
	3.5	11.4
<b>Tappeti vinilici</b>	3	17.7
	3.5	15.7
	3.5	18.9
	4	17.4
<b>Moquette</b>	4	19.3
	4	20.6
	4	21.5
	4	23.6
	5	20.9
	6	26.3
	7	29.4
	8	28.4
	8	30.0
	10	33.5
	12	35.6
14	36.8	

Tabella 30: Attenuazione di alcuni rivestimenti per solai

### Pavimento galleggiante

Il pavimento galleggiante ha un rivestimento che lo ricopre interamente impedendo la propagazione anche laterale delle onde impattive. L'efficacia di isolamento dipende fortemente dalla capacità di attenuazione del materiale utilizzato e dalla sua frequenza naturale di risonanza in corrispondenza della quale si ha il massimo della trasmissione. Questa vale:

$$f_0 = \frac{1}{2} \pi \sqrt{\frac{k}{\sigma}} \quad [101]$$

ove  $\sigma$  è la massa superficiale del pavimento galleggiante ( $\text{kg/m}^2$ ) e  $k$  la rigidità del materiale elastico interposto ( $\text{N/m}^2$ ). E' bene avere  $f_0$  inferiore a 90 Hz e ciò lo si può ottenere mediante l'utilizzo di materiale di elevata densità superficiale e con bassa costante elastica.

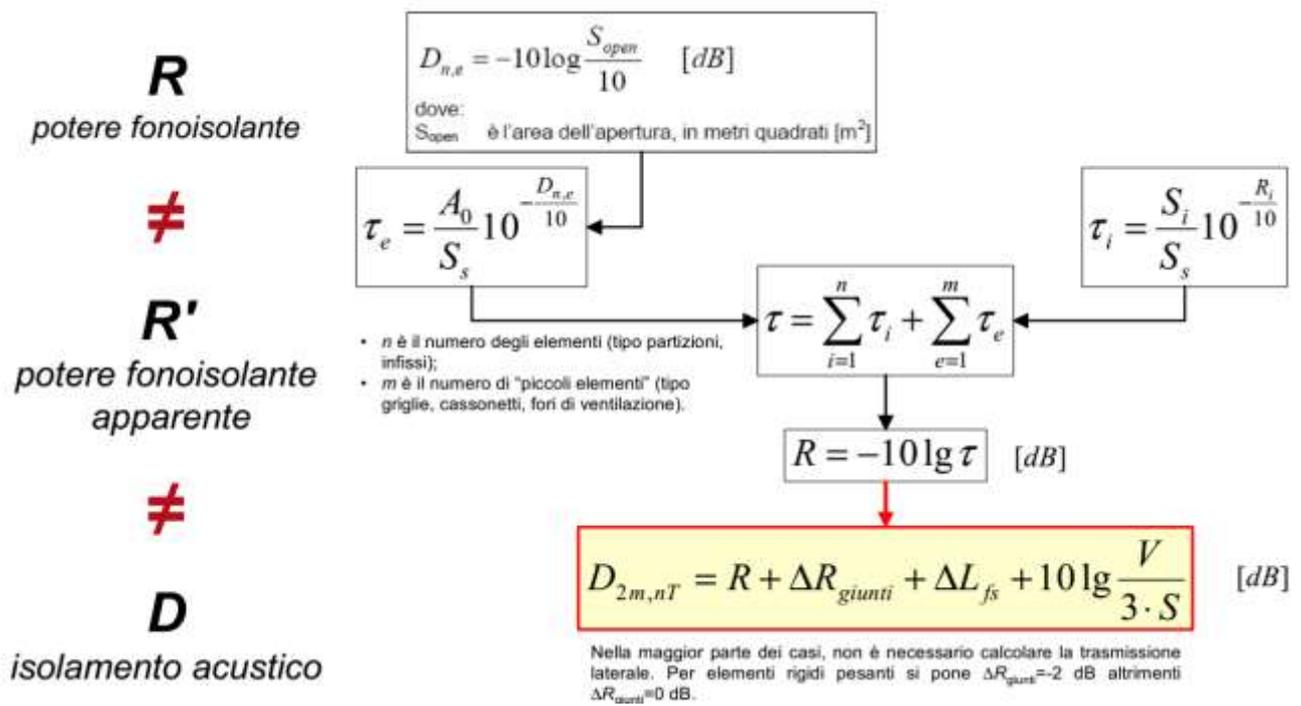
### Soffitti sospesi

Per ridurre la trasmissione dei rumori impattivi si può intervenire anche sulla superficie opposta del pavimento e cioè a soffitto dell'ambiente sottostante.

I materiali utilizzati sono identici a quelli indicati per i pavimenti e valgono ancora le stesse relazioni di calcolo. Si osservi che nella messa in opera dei soffitti sospesi si debbono evitare le connessioni meccaniche rigide che trasmettono vibrazioni dannose. Inoltre per accrescere l'attenuazione è opportuno inserire materassini di materiale assorbente (lana di roccia) fra il soffitto sospeso e la superficie inferiore del solaio.

#### 11.8.4. CALCOLO DELL'ISOLAMENTO DI FACCIATA

Si può utilizzare il seguente schema di calcolo.



L'assorbimento è indicato dal coefficiente di assorbimento acustico ponderato  $\alpha_w$  (UNI EN ISO 11654) come:  $\leq 0,3$ ;  $0,6$  oppure  $\geq 0,9$ . L'effetto per i valori intermedi può essere dedotto per interpolazione; si applica  $\alpha_w \geq 0,9$  anche nel caso non sia presente una superficie riflettente sopra la facciata considerata.

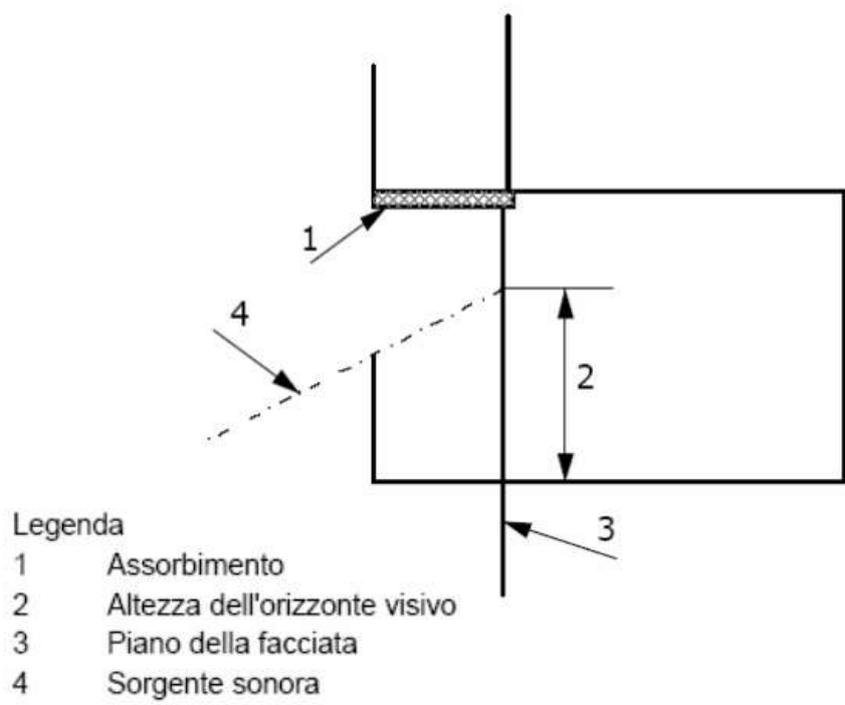


Figura 137: Schematizzazione della procedura di calcolo

$\Delta L_{15}$	1 facciata piana	2 ballatoio			3 ballatoio			4 ballatoio			5 ballatoio				
dB															
Assorbimento del tetto ( $\alpha_w$ ) =	Non applicabile	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$		
Orizzonte visivo sulla facciata <1,5 m	0	-1	-1	0	-1	-1	0	0	0	1	Non applicabile				
(1,5 – 2,5) m	0	Non applicabile			-1	0	2	0	1	3	Non applicabile				
>2,5 m	0	Non applicabile			1	1	2	2	2	3	3	4	6		
	6 balcone	7 balcone			8 balcone			9 terrazza							
Assorbimento del tetto ( $\alpha_w$ ) =	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$
Orizzonte visivo sulla facciata <1,5 m	-1	-1	0	0	0	1	1	1	2	1	1	1	3	3	3
(1,5 – 2,5) m	-1	1	3	0	2	4	1	1	2	3	4	5	5	6	7
>2,5 m	1	2	3	2	3	4	1	1	2	4	4	5	6	6	7

Figura 138: Tipologia di facciate

Per l'isolamento di facciata calcolato per un ambiente di 4 m di larghezza, 3,5 m di profondità e 2,7 m di altezza al variare del potere fonoisolante di un serramento in legno a due ante di dimensioni 1,5x1,25 m si ha la seguente figura:

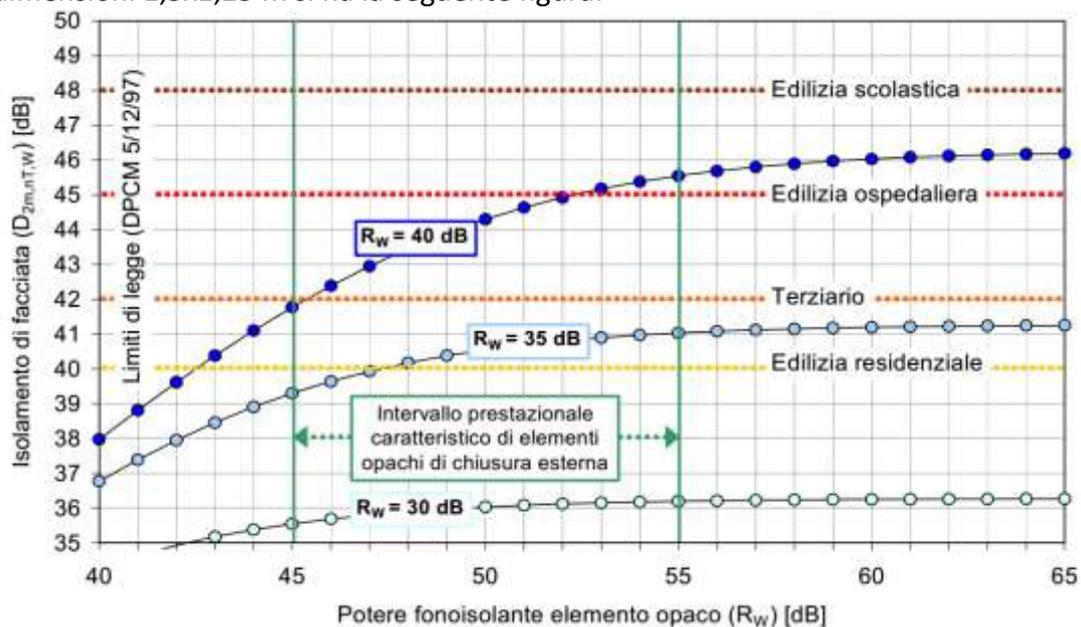


Figura 139: Limiti prestazionali dell'isolamento di una facciata

## 11.9. SOSPENSIONE DEI DM 5/12/1997

La sospensione è stata disposta dalla Legge 88/2009 (Legge Comunitaria 2008, attuazione della Direttiva 2002/49/CE), la quale prevede all'art. 11 la Delega al Governo affinché provveda al riordino della disciplina in materia di inquinamento acustico, entro sei mesi dall'entrata in vigore della legge stessa (entrata in vigore 29 luglio 2009, quindi entro fine gennaio 2010).

La necessità di riscrivere completamente il decreto sui requisiti acustici passivi degli edifici nasce dalla scarsa attuazione del DPCM del 1997, il quale presenta limiti ed errori formali; inoltre vi è l'effettiva difficoltà di applicabilità ai diversi casi reali, dovuta alla mancata promulgazione del decreto recante i criteri acustici per la progettazione, l'esecuzione e la ristrutturazione degli edifici, ed alla quasi totale mancanza di controlli e di richieste progettuali in fase di approvazione di licenza edilizia da parte della Pubblica Amministrazione. Si rende quindi necessaria una revisione che superi le ambiguità e le incoerenze contenute nel DPCM 5 dicembre 1997.

I termini per la stesura del nuovo decreto sono scaduti lo scorso gennaio 2010, determinando una situazione precaria non solo per la mancanza di una legge cui fare riferimento, ma anche per il fenomeno di contenziosi nei rapporti di vendita tra costruttori/venditori di immobili ed acquirenti (privati cittadini), il quale non trova alcuna applicazione legislativa a seguito del provvedimento di sospensione del DPCM.

La situazione attuale è momentaneamente stazionaria: i sei mesi occorsi per elaborare un Decreto Legislativo non sono stati sufficienti, pertanto la Delega al Governo è stata rinnovata.

Il gruppo tecnico incaricato di elaborare la legge ha ritenuto opportuno attendere il testo della Proposta di Norma Uni "Classificazione acustica degli edifici", in modo da evitare di perdere importanti contenuti tecnici.

La Norma Uni, redatta dal Gruppo di Lavoro 5 "Classificazione acustica degli edifici" si propone di definire i requisiti acustici prestazionali degli edifici ed i criteri per la loro misurazione e valutazione.

La norma si applica ad ogni "unità immobiliare", definita come "porzione di fabbricato, fabbricato o insieme di fabbricati ovvero un'area che, nello stato in cui si trova e secondo l'uso locale, presenta potenzialità di autonomia funzionale e reddituale".

E' prevista una suddivisione in destinazioni d'uso (residenze; uffici; alberghi e pensioni; attività ricreative o di culto) alle quali si applica la classificazione acustica. La classificazione acustica di un sistema edilizio, che viene introdotta nella norma, consente di informare compiutamente i futuri utilizzatori sulle caratteristiche dell'edificio che andranno ad abitare o ad occupare.

Sono state definite 4 classi:

1. classe I: prestazioni acustiche ottime;
2. classe II: prestazioni acustiche buone;
3. classe III: prestazioni acustiche di base;
4. classe IV: prestazioni acustiche modeste.

Ogni unità immobiliare è soggetta a classificazione ed apparterrà ad una di queste classi, ad eccezione di ospedali e scuole, per i quali non è prevista la classificazione, ma vengono indicati valori di riferimento per ognuno dei requisiti considerati. I requisiti che vengono presi in considerazione sono gli stessi previsti dal DPCM del 1997. Ad ognuno di essi corrisponderà una classe, in modo da fornire un range più ampio di possibilità nella progettazione acustica di ogni edificio, adattandolo alle esigenze specifiche. A seguito dell'approvazione di tale norma si tratterà di attendere il recepimento della stessa a livello legislativo, al fine di riordinare il gran caos creatosi negli anni precedenti e tuttora in corso.



## 12. ACUSTICA AMBIENTALE

Il Suono è certamente una fonte di informazione fra le più importanti. Tuttavia quando assume i riferimenti di rumore pone problemi notevoli. Si sono visti gli effetti del rumore negli ambienti di lavoro, ora si vedranno gli effetti del rumore prodotto nell'ambiente esterno per effetto, fra le principali cause, del traffico veicolare e/o di attività antropiche.

Si presenteranno nei prossimi paragrafi alcune considerazioni sull'Acustica Ambientale e in particolare sulla rumorosità esterna. Si esamineranno inizialmente le fonti di rumore principali e poi si farà cenno ad alcune metodologie innovative.

### 12.1. RUMORE AUTOVEICOLARE

Gli autoveicoli (leggeri e pesanti) sono fra le principali cause di inquinamento urbano.

Essi emettono rumore che può essere localizzato in vari componenti veicolari quali il motore, la trasmissione, la ventola di raffreddamento, lo scarico e il rotolamento, come riportato dalla seguente tabella.

Nella Tabella 31 si ha l'andamento della potenza acustica a diverse marce per diversi rapporti di trasmissione senza decelerazione.

Tipo di veicolo	Leggero	Pesante
Rumorosità (db(A))		
Motore	84	90
Trasmissione	65	70
Ventola di raffredd.	65	78
Aspirazione	65	70
Scarico	74	82
Rotolamento	68	70

Tabella 31: Potenze acustiche delle componenti di un autoveicolo

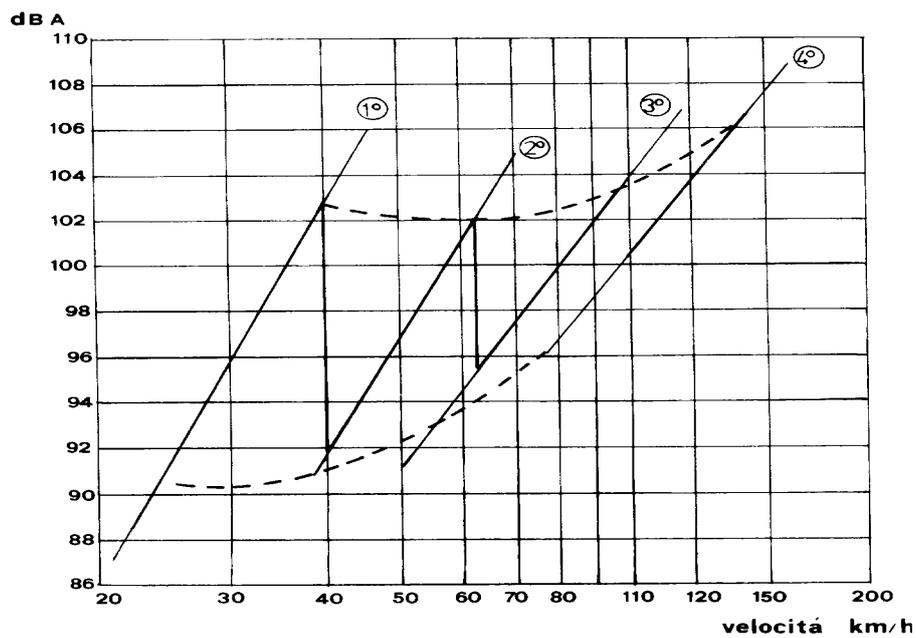


Figura 140: Rumorosità del veicolo al variare della velocità

## 12.2. SPETTRO DEL RUMORE VEICOLARE

Lo spettro del rumore prodotto dagli autoveicoli é del tipo qui raffigurato (Figura 141, CSTB) e si può osservare come dominano le basse frequenze.

Nella seconda figura si ha lo spettro normalizzato del rumore veicolare proposto in Francia.

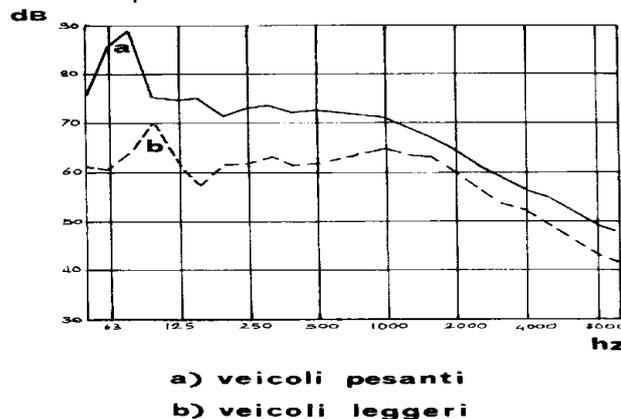


Figura 141: Spettro dei rumori di auto e veicoli pesanti secondo CSTB

### 12.3. MOTORI DI AEREO A REAZIONE E TURBOELICA

Il rumore di origine aeronautico é rilevante anche a causa delle potenze emmissive dei motori (a reazione e turboelica).

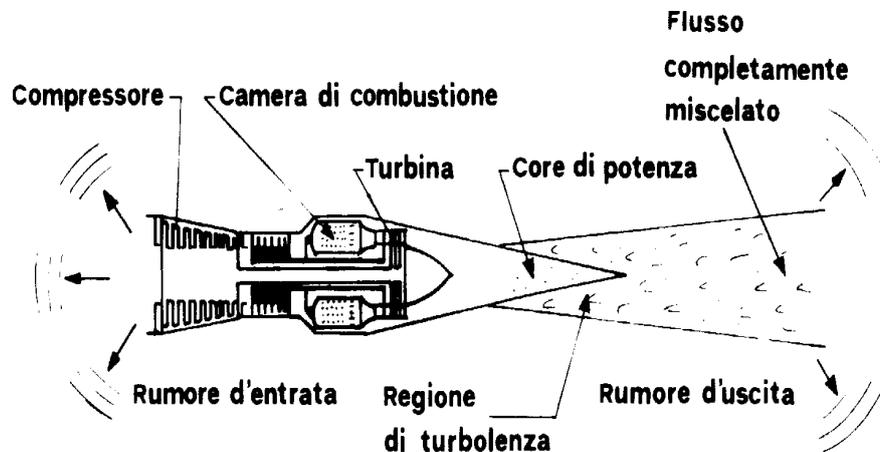


Figura 142: Schema di una turbina di aereo

### 12.4. DESCRIZIONE DEL RUMORE DA TRAFFICO VEICOLARE

Il livello del rumore da traffico veicolare può essere rappresentato mediante una relazione funzionale del tipo:

$$L = A \log Q + C$$

con A e C costanti da determinare mediante analisi statistica e Q rappresenta il Flusso veicolare totale equivalente dato dalla somma del numero dei veicoli leggeri più quelli pesanti e dei motocicli secondo una relazione del tipo:

$$Q = n_1L + n_2P + n_3M$$

ove  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$  sono coefficienti da valutare con analisi statistica, L, P ed M sono il numero di veicoli leggeri, pesanti e di motocicli. La velocità di flusso influenza notevolmente il livello di rumorosità da traffico veicolare.

#### 12.5. Dipendenza dalle caratteristiche della strada

Le caratteristiche della strada influenzano moltissimo la produzione della rumorosità da traffico veicolare.

La presenza o meno di edifici ai lati della strada, le condizioni del manto stradale e della manutenzione nonché della pendenza sono parametri determinanti al fine della valutazione del rumore veicolare.

Per la pendenza stradale si può utilizzare l'abaco di Figura 143 nel quale, in funzione della percentuale di mezzi pesanti, si ha la correzione da apportare per la variazione della velocità di traffico.

La presenza del terreno assorbente attenua il rumore a secondo della distanza dal bordo e l'altezza dell'edificio.

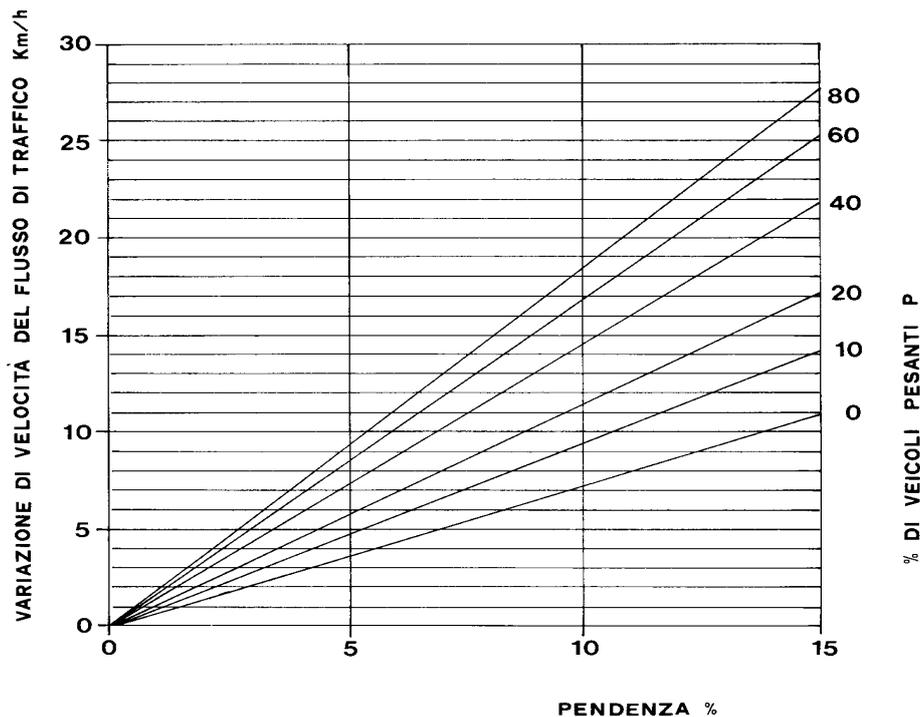


Figura 143: Correzione per pendenza della strada

## 12.6. CORRELAZIONI STATISTICHE

Per lo studio della rumorosità urbana si hanno diverse relazioni sperimentali sotto forma di correlazioni statistiche.

### 12.6.1. CORRELAZIONE DI JOSSE

Una correlazione di facile utilizzo è la relazione di Josse (1972, [33]):

$$L_{eq,A} = 388 - 15 \text{Log}(n_{eq}) + 10 \text{Log}(w)$$

con:

$$n_{eq} = c_1 \cdot n_a + c_2 \cdot n_m + c_3 \cdot n_c$$

ove:

- $n_a$  è il numero di automobili all'ora;
- $n_m$  è il numero di motocicli all'ora;
- $n_c$  è il numero di camion all'ora;

$c_1, c_2, c_3$  fattori di equivalenza pari, rispettivamente, a 1, 3 e 6 per la tipologia di traffico delle città della Sicilia.

### 12.6.2. CORRELAZIONE EMPA (SVIZZERA)

$$L_{eq} = 42 + 10 \text{Log} \left\{ \left[ 1 + \left( \frac{V}{50} \right)^2 \right] \cdot \left[ 1 + 20 \cdot \mu \cdot \left( 1 - \frac{V}{150} \right) \right] \right\} + 10 \text{Log}(M)$$

[102]

con:

- V velocità media dei veicoli, km/h
- $\frac{P}{M}$  rapporto fra veicoli pesanti e veicoli leggeri
- M flusso veicolare totale, (Veicoli/ora).

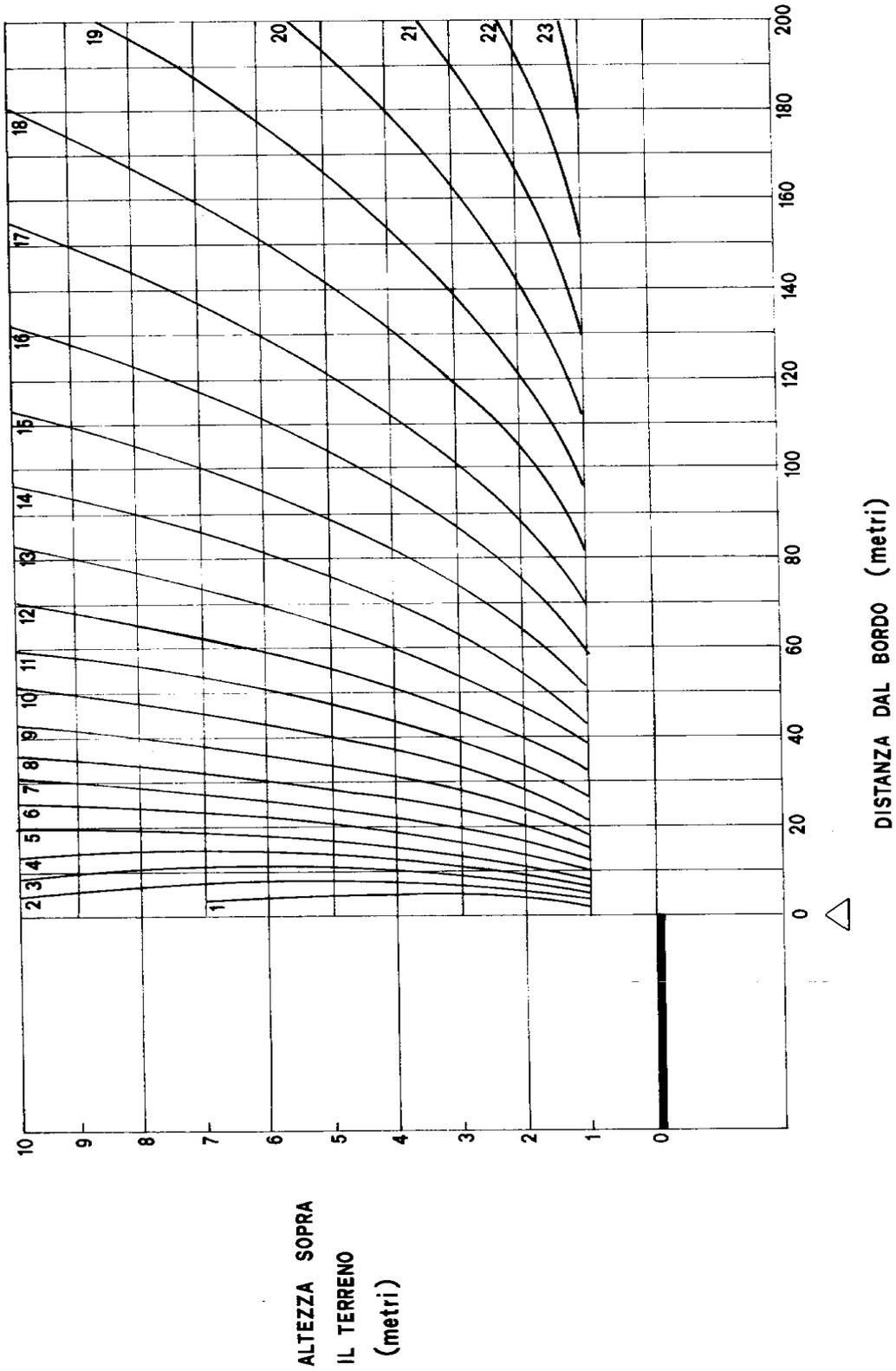


Figura 144: Correzione per assorbimento del terreno assorbente

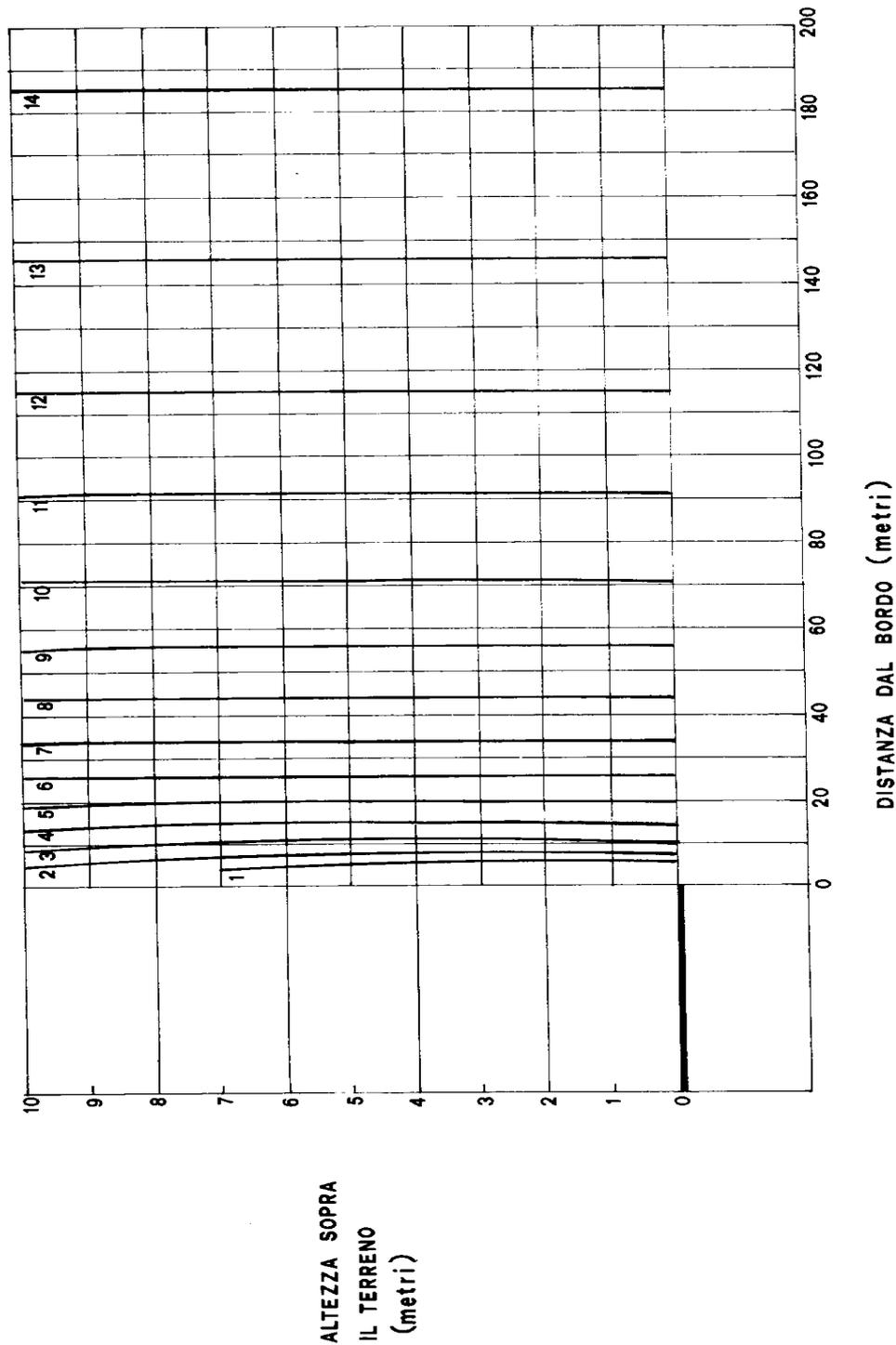


Figura 145: Assorbimento con terreno riflettente

### 12.6.3. CORRELAZIONE CRTN (GRAN BRETAGNA)

$$L_{10} = 10 \log Q + 33 \log \left( V + 40 + \frac{500}{V} \right) + 10 \log \left( 1 + \frac{5p}{V} \right) - 27,6 \quad (dB(A)) \quad [103]$$

ove:

- Q flusso totale, (veicoli/ora)
- V velocità media dei veicoli, (km/h)

- P percentuali dei veicoli pesanti (con peso a vuoto > 1525 kg).

#### 12.6.4. CORRELAZIONE UE

$$L_{eq,A} = 10 \text{Log} \left( 10^{L_l/10} + 10^{L_h/10} \right) \quad (dB(A)) \quad [104]$$

ove si pone:

$$L_l = 91 + 0.14V_l + 10 \text{Log} \left( \frac{Q_l}{2} V_l \cdot 1000 \right) \quad (dB(A)) \quad [105]$$

$$L_h = 101 + 0.14V_h + 10 \text{Log} \left( \frac{Q_h}{2} V_h \cdot 1000 \right) \quad (dB(A)) \quad [106]$$

con:

- $L_l$  livello dei veicoli leggeri aventi flusso  $Q_l$  e velocità  $V_l$
- $L_h$  livello dei veicoli leggeri aventi flusso  $Q_h$  e velocità  $V_h$

#### 12.6.5. CORRELAZIONE DEL CNR

Una correlazione proposta dal CNR ed utilizzata per lo studio della rumorosità ambientale a Roma è la seguente:

$$L_{eq,A} = 35.1 + 10 \text{Log} (Q_L + 8Q_P) + 10 \text{Log} \left( \frac{d_0}{d} \right) + \sum_i \Delta L_i \quad [107]$$

ove:

- $d_0$  pari a 25 m;
- $\Delta L_i$  termini correttivi per velocità (da -1.5 a 4), superficie del manto (da -0.5 a 4 dB), per pendenza della strada (da 0 a 3 dB), per presenza di incrocio (da 0 a 1 dB).

#### Correlazione TURBO (Traffico Urbano Bologna)

Una correlazione proposta dall'Università di Bologna è la seguente:

$$L_{eq,A} = 38.9 + 9.9 \text{Log} (Q_L + 8Q_P) + 5.6 \text{Log} \left( \frac{d_0}{d} \right) - 0.02V + \sum_i \Delta L_i \quad [108]$$

con significati simile alla correlazione CNR e con livelli correttivi per presenza di portici (1 dB), strade strette ed edifici alte (effetto di riverbero o effetto *canyon*, 1 dB), per velocità minore di 30 km/h (-1.5 dB), per superficie del manto (da -2 a 1 dB), per pendenza della strada (da 0 a 3 dB), per vicinanza di un incrocio (da 0 a 1 dB) e per assenza di veicoli pesanti (-1.8 dB).

## 12.7. RUMORE FERROVIARIO

Il rumore generato dal traffico ferroviario è fortemente influenzato dal materiale rotabile (peso, età, ..), dalle condizioni dei binari e dalla velocità di transito.

In genere lo spettro sonoro si sposta verso frequenze più elevate rispetto al traffico stradale e pertanto si hanno migliori possibilità di isolamento (si ricordi l'andamento della *legge di massa*) sia con le pareti degli edifici che con eventuali schermi.

A differenza del traffico stradale quello ferroviario è caratterizzato da una durata limitata ma con forti intensità seguita da lunghe pause. Pertanto è più corretto riferirsi all'evento singolo più che al livello equivalente. Inoltre occorre valutare l'intensità massima che si ha nella minore distanza dai convogli.

Il calcolo del livello sonoro è molto complesso anche in considerazione della natura lineare della sorgente sonora. Si hanno numerosi modelli e si può dire che ogni ente nazionale propone una propria correlazione. Si riporta qui la correlazione di *Cato*:

$$L_{eq,A} = 22.5 + 10 \text{Log} \left( \frac{1}{T} \sum_{j=1}^N \frac{V_j^{3.2} L_j}{d} \right) \quad [109]$$

ove si ha:

- $T$  durata complessiva del periodo considerato,  $s$
- $V_j$  velocità,  $km/h$
- $L_j$  lunghezza, in  $m$ , degli  $N$  treni che transitano nel periodo  $T$
- $d$  distanza dall'asse del binario,  $m$ .

## 12.8. BARRIERE ACUSTICHE

Normalmente si può ridurre l'effetto della rumorosità da traffico veicolare utilizzando opportune barriere acustiche del tipo illustrato nella Figura 146 nella quale è anche riportata una tabella per il calcolo rapido dell'attenuazione acustica prodotta dalla barriera con il metodo di *Fresnel*.

Nelle figure seguenti si hanno varie tipologie di barriere acustiche sia di tipo opaco che trasparente (policarbonato), quest'ultime usate nei casi nei quali la riduzione dell'impatto visivo è importante.

Si osservi che i metodi semplificati qui riportati debbono essere considerati di primo tentativo e che il progetto definitivo delle barriere acustiche necessita di mezzi più avanzati quali, ad esempio, i CAD acustici che prendono in considerazione tutte le componenti in gioco.

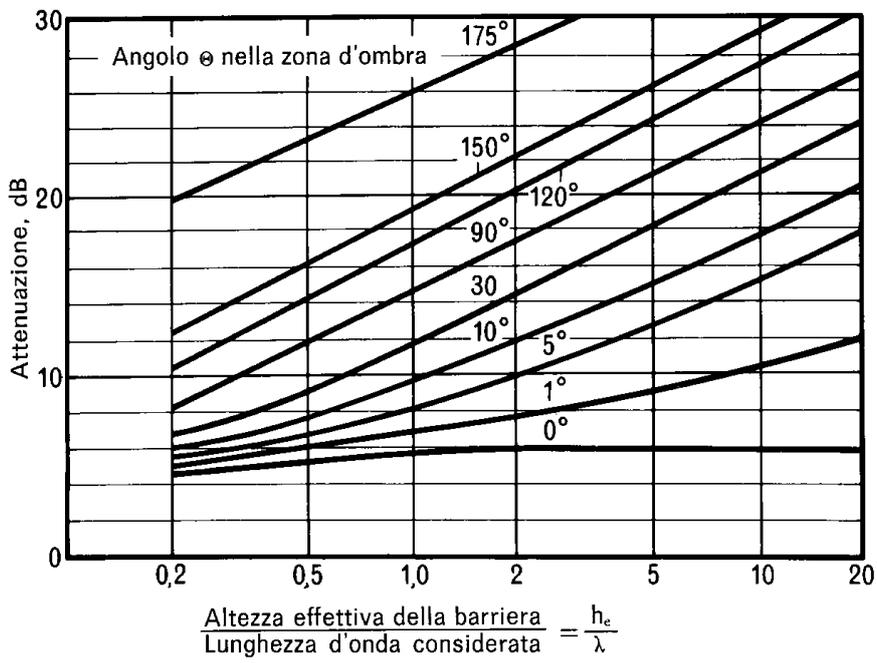
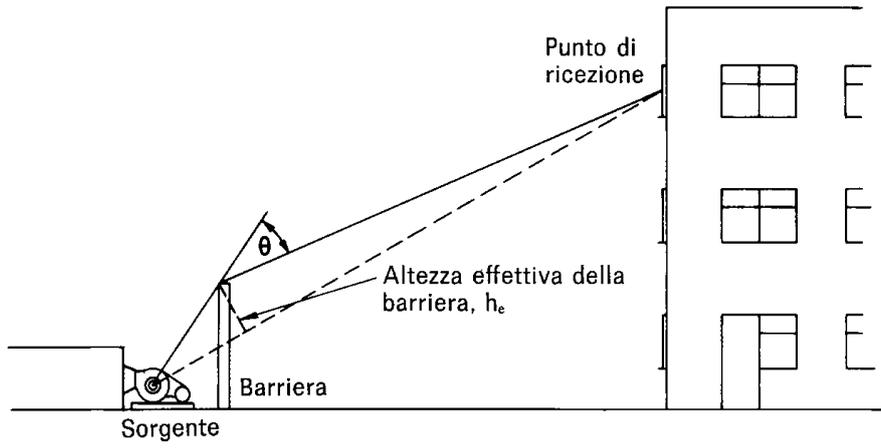
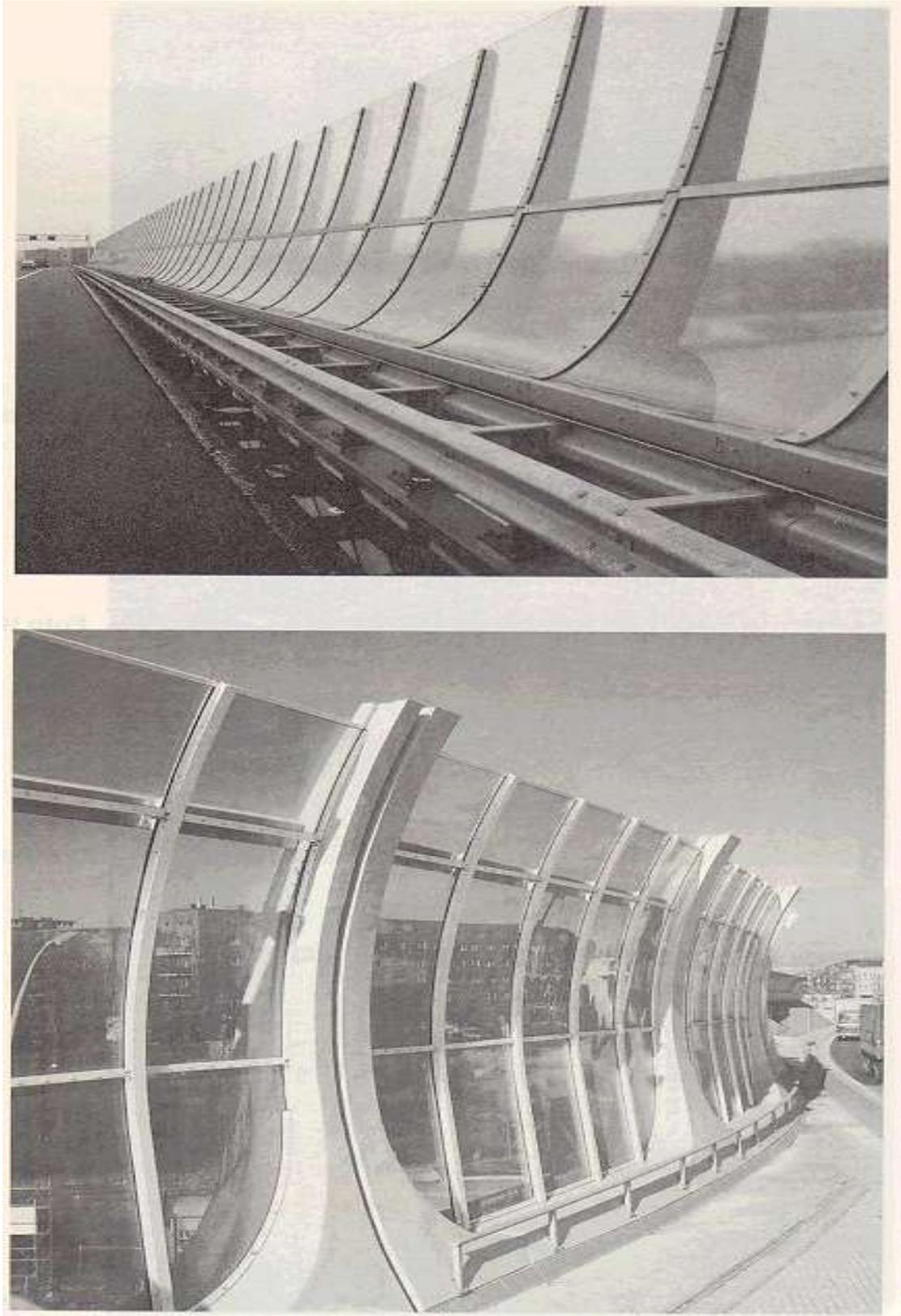
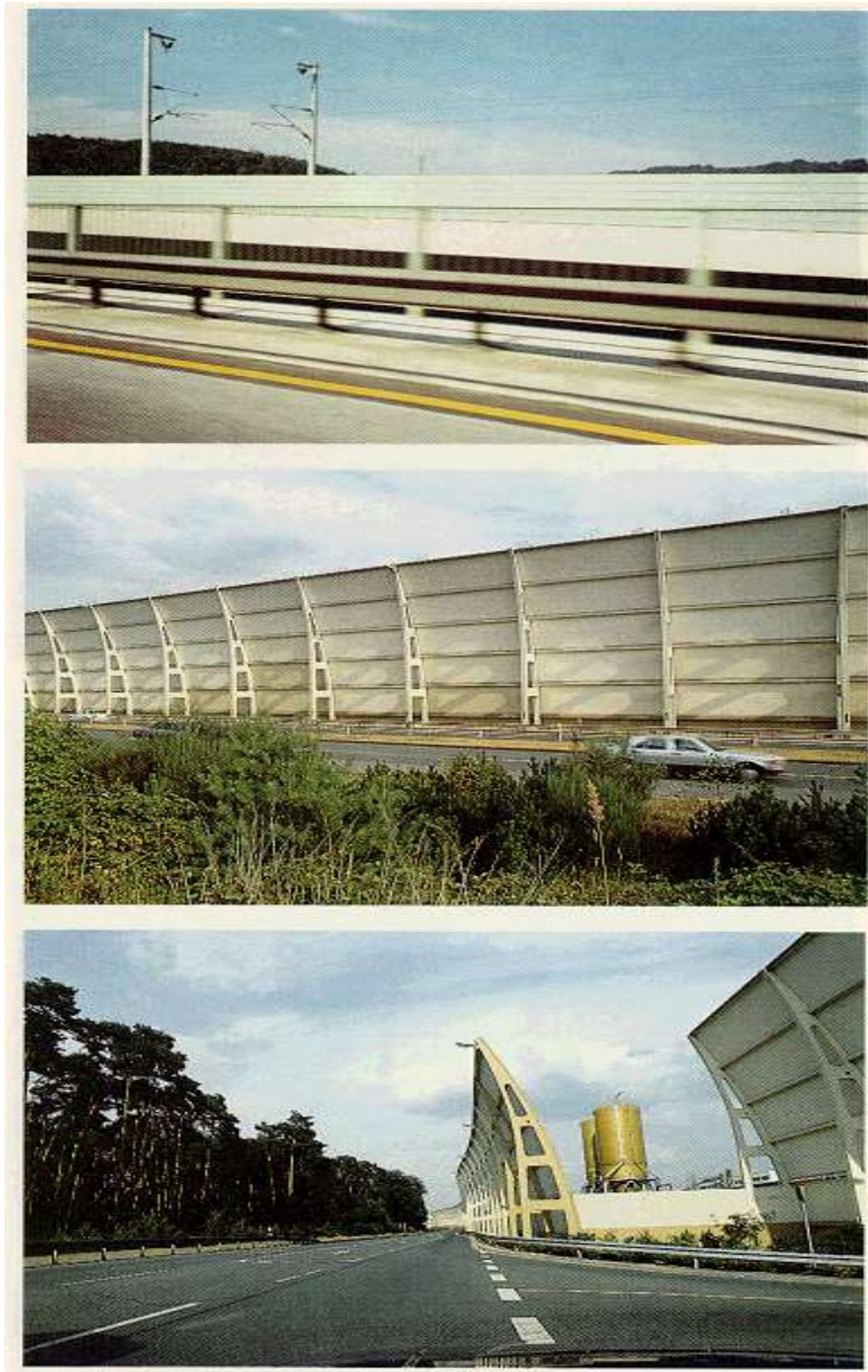


Figura 146: Criterio di progetto semplificato di barriere acustiche



*Figura 147. Barriere in policarbonato trasparenti*



*Figura 148: Barriere acustiche in metallo o in cemento*

## 12.9. NUOVE METODOLOGIE PER LA MODELLISTICA DEL RUMORE URBANO

LO studio e la preparazione dei modelli acustici per il rumore urbano ha ricevuto una forte accelerazione in questi ultimi anni grazie all'introduzione di un'adeguata legislazione (L. 447/95 e decreti attuativi regionali conseguenti).

I comuni stanno già operando per la zonizzazione acustica del loro territorio e per la redazione dei piani di risanamento conseguenti.

E' proprio in quest'ultima delicatissima fase che la modellazione acustica del rumore urbano può fornire tutto il suo apporto alla risoluzione del problema e alla formulazione di piani di risanamento affidabili.

Di recente sono state introdotte nuove tecniche di modellazione del rumore da traffico urbano sviluppate mediante algoritmi neurali e *fuzzy*, hanno mostrato una migliore capacità di rappresentazione rispetto a quelle riportate in letteratura e sviluppate principalmente con approcci statistici.

La potenzialità di modellazione di questi nuovi algoritmi non è stata, in precedenza, completamente investigata in quanto in letteratura vengono riportati anche modelli più complessi (complessità rispetto al numero di variabili di ingresso al modello).

Sono stati, pertanto, messi a punto modelli neurali con un numero maggiore di variabili di ingresso. Quanto qui presentato è parte degli studi effettuati dall'Istituto di Fisica Tecnica della Facoltà di Ingegneria di Catania negli ultimi dieci anni. I metodi qui delineati sono quelli che fanno uso di *reti neurali* e di *fuzzy logic*.

I modelli previsionali neurali sono stati utilizzati anche per la calibrazione di modelli di modelli di simulazione a tracciamento inverso di raggi che consente di determinare i livelli di rumore in siti urbani complessi, di redigere delle mappe di rumore e di ottimizzare alcune soluzioni di protezione acustica come le barriere, i terrapieni e gli asfalti fonoassorbenti.

### 12.9.1. LE RETI NEURALI

Le attuali reti neurali possono essere considerate un modello molto approssimato dei sistemi nervosi degli animali e del cervello umano in particolare: la loro caratteristica fondamentale è infatti quella di essere adattabili, dotate cioè della capacità di apprendere la soluzione di determinati problemi o in base alla presentazione di esempi noti (apprendimento supervisionato) o in base all'interazione con il mondo reale senza la guida di un "*maestro*" (apprendimento non supervisionato). Tale aspetto rende le reti neurali particolarmente adatte ad affrontare problemi in cui i calcolatori tradizionali falliscono o perché non esiste un algoritmo adeguato o perché esso risulterebbe estremamente complesso o non è perfettamente definito o richiederebbe tempi assai lunghi per la sua esecuzione o perché le informazioni su un determinato problema sono imprecise, incomplete, distorte.

E' possibile definire una rete neurale come un sistema costituito da unità elementari denominate, con terminologia variabile da autore ad autore, neuroni artificiali, neuroni, nodi, ciascuna delle quali è dotata di un certo numero di terminali di ingresso e di un terminale di uscita]. Tali terminali permettono l'interconnessione tra queste unità elementari; ad ogni terminale è associato un numero, chiamato peso, che rappresenta l'intensità con cui i vari neuroni si influenzano.

Un neurone artificiale può essere schematizzato come un'unità computazionale dotata di un certo numero di ingressi e di una sola uscita. Si consideri l'*i*-esimo neurone di una rete neurale che

riceve  $n$  segnali di ingresso provenienti dalle uscite di altrettanti neuroni ad esso collegati (vedi Figura 149).

Detti  $x_1, x_2, \dots, x_n$  gli ingressi del neurone  $i$ -esimo, l'ingresso  $x_j$ , ovvero l'uscita del  $j$ -esimo neurone, viene trasmesso all' $i$ -esimo neurone opportunamente pesato, cioè moltiplicato per un valore che tiene conto dell'accoppiamento sinaptico tra il  $j$ -esimo neurone e l' $i$ -esimo. Se tale peso viene denotato con  $w_{ij}$ , il segnale  $x_j$  che l' $i$ -esimo neurone riceve dallo  $j$ -esimo è dato da  $w_{ij}x_j$ . Gli  $n$  neuroni connessi all' $i$ -esimo neurone concorreranno tutti a determinare il suo stato di attivazione, che è calcolato come la sommatoria dei prodotti  $w_{ij}x_j$  per  $j=1,2,\dots,n$ :

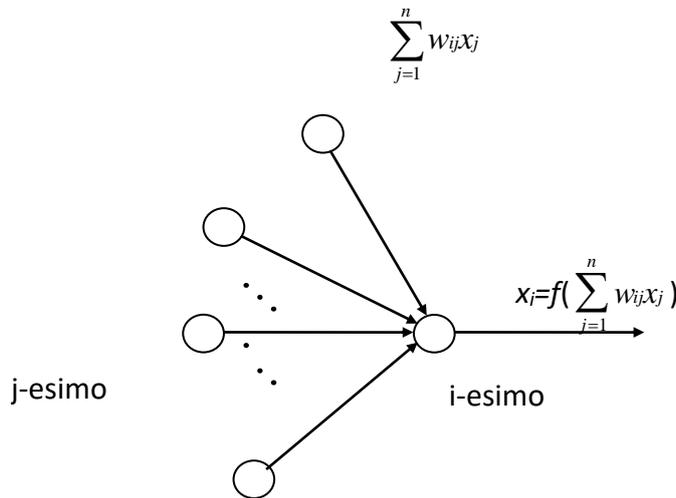


Figura 149: Il neurone artificiale

Il valore di uscita dell' $i$ -esimo neurone è fornito dalla seguente relazione:

$$x_i = f\left(\sum_{j=1}^n w_{ij}x_j\right)$$

La funzione  $f\left(\sum_{j=1}^n w_{ij}x_j\right)$  viene di norma indicata come funzione di attivazione. La funzione di attivazione inibisce l'attivazione del neurone  $i$ -esimo fino ad un determinato valore di soglia. In genere è possibile utilizzare diversi tipi di funzioni di attivazione che differenzieranno i corrispondenti modelli neurali. La funzione di attivazione dovrà essere comunque di tipo a rampa e le più frequenti assumono le seguenti espressioni:

$$f(z) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda z}}$$

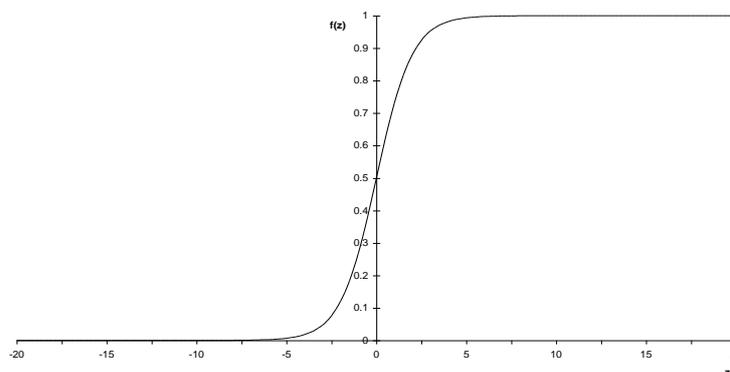


Figura 150: la funzione a sigmoide utilizzata

$$f(z) = \begin{cases} +1, & z > 0 \\ 0 & z < 0 \end{cases}$$

dove  $\lambda$  è un parametro che fa variare la pendenza della funzione di attivazione e la variabile  $z$  rappresenta l'insieme dei valori di attivazione (il corrispondente del potenziale della membrana cellulare). Le precedenti funzioni sono rispettivamente chiamate funzione di attivazione unipolare continua o sigmoidale e funzione di attivazione unipolare binaria. Nei modelli utilizzati è stata utilizzata la funzione logistica non lineare:

$$f(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad [110]$$

ottenuta dalla precedente definizione sigmoidale ponendo  $\lambda=1$ . In Figura 150 è mostrato il grafico di questa funzione. In Figura 151a è mostrato qualitativamente, per una generica rete neurale, lo stato di attivazione dei singoli neuroni mediante delle barre colorate in rosso; la lunghezza delle barre è variabile in funzione del minore o maggiore stato di attivazione.

Nella Figura 151b sono riportati anche, sempre a livello qualitativo, i valori dei pesi delle singole sinapsi indicati da colorazioni più o meno intense.

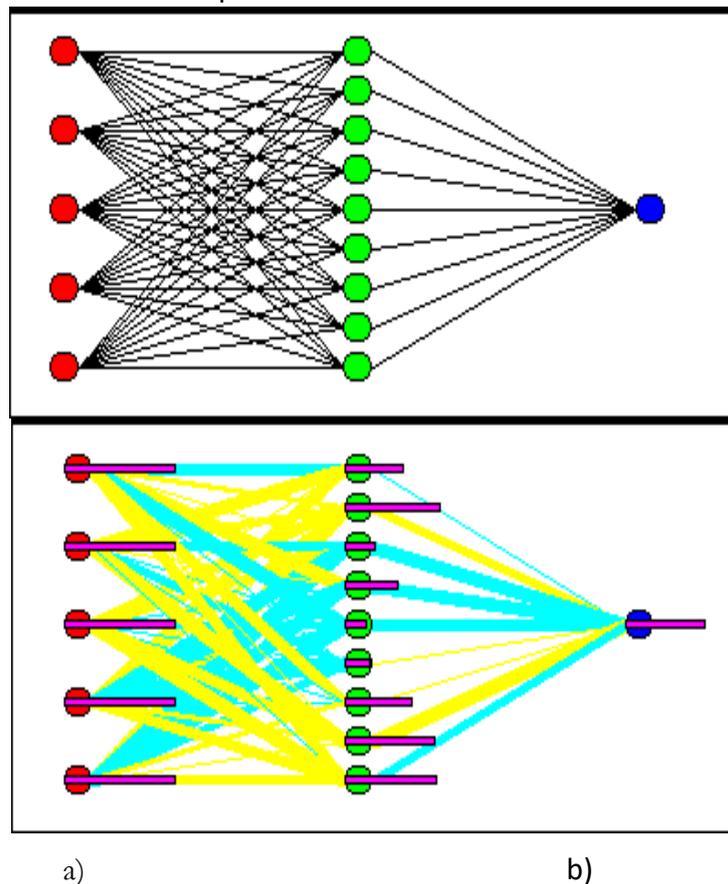


Figura 151: Per la rete neurale a) sono indicati lo stato di attivazione dei neuroni e il valore dei pesi durante l'allenamento

Nel 1958 Roseblatt [10] ideò una struttura nota come *perceptrone*: una rete neurale a due strati, uno di ingresso ed uno di uscita, in grado di apprendere e classificare un certo numero di funzioni tramite un processo di apprendimento supervisionato che conduce ad una modifica del valore delle connessioni tra i neuroni.

Alla fine degli anni '60 furono evidenziati i limiti di tale struttura incapace, ad esempio, di risolvere alcuni problemi banali come ad esempio la funzione *or* esclusivo [11].

L'utilizzo delle reti neurali a più strati e con neuroni che utilizzano funzioni di attivazione non lineari [12], che consente di superare le limitazioni intrinseche del perceptrone, non era tuttavia possibile in quegli anni.

Gli algoritmi di apprendimento, infatti, sono in genere basati sull'aggiornamento dei pesi delle connessioni di ogni neurone in base all'errore da esso commesso che è possibile definire come la differenza tra l'uscita reale e l'uscita voluta.

L'uscita desiderata è nota ovviamente solo per i neuroni dello strato di uscita, quindi nelle reti neurali a più strati l'uscita non è nota ai neuroni degli stati intermedi detti neuroni nascosti (*hidden*). L'algoritmo noto come *back-propagation*, introdotto nella metà degli anni '80, consentì di risolvere tale problema [13].

Con tale regola di apprendimento, infatti, l'errore relativo ai neuroni dello strato di uscita viene propagato all'indietro verso lo strato di ingresso, consentendo così la modifica dei pesi delle connessioni tra i neuroni dei vari strati.

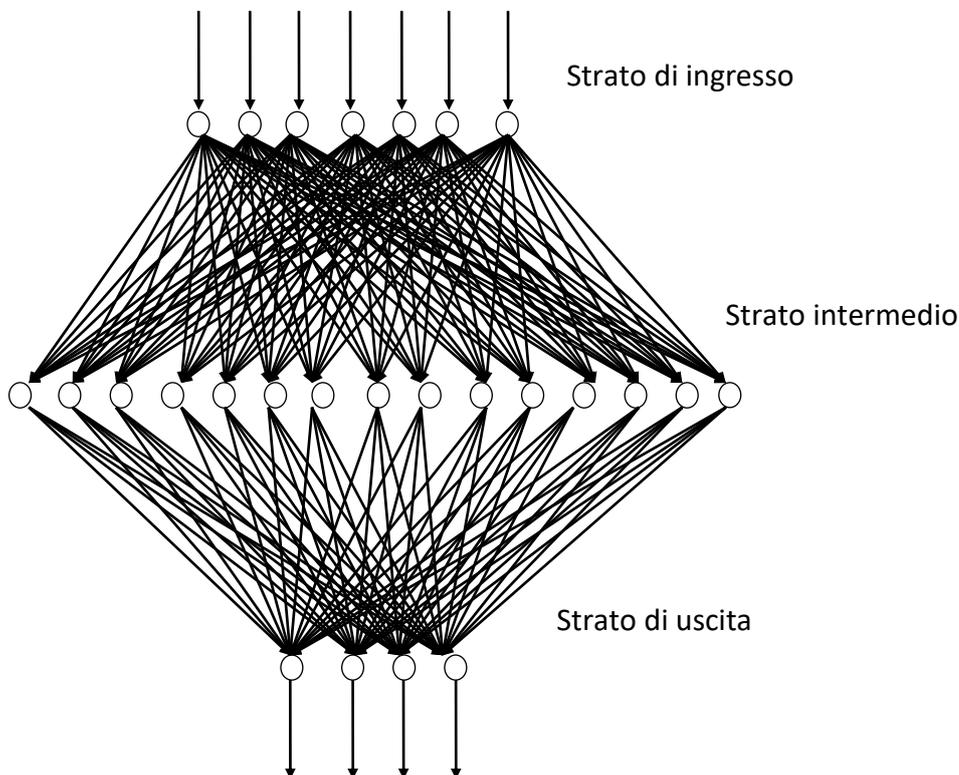


Figura 152 - Un esempio di perceptrone multistrato con uno strato di neuroni hidden.

La *back-propagation* permette quindi l'apprendimento del *perceptrone* multistrato che è la struttura di rete neurale di seguito utilizzata.

Nei *perceptroni* multistrato, con uno strato di neuroni *hidden*, non esistono collegamenti orizzontali tra neuroni di uno stesso strato. Gli strati decisionali sono quelli di uscita e quello intermedio.

Le reti utilizzate non possiedono retroazioni tra i neuroni e quindi il segnale si propaga dallo strato di input a quello di output (*reti feedforward*). Questo tipo di reti sono utilizzate per descrivere modelli statici quali sono appunto quelli qui considerati; si può ritenere infatti che il rumore prodotto dal traffico veicolare non sia influenzato dal rumore prodotto in precedenza e

che quindi ci sia uno stretto legame istantaneo di causa ed effetto fra traffico veicolare e rumorosità prodotta.

Nella Figura 152 è riportato un esempio che illustra il tipo di struttura delle reti neurali adottate. Nell'esempio considerato si hanno sei neuroni di ingresso, quindici neuroni hidden e quattro neuroni di uscita.

Addestrare una rete neurale significa fornirle un insieme di esempi specifici (*pattern* di allenamento o di *learning*) in modo da farle modificare per "piccoli passi" i pesi, "ciclando" più volte sugli esempi da apprendere, un po' come facciamo noi per imparare a memoria una poesia. Come già accennato, nello schema di apprendimento qui utilizzato (apprendimento supervisionato) per ogni *pattern* presentato all'ingresso della rete viene fornita dal "maestro" la risposta del sistema desiderata.

La rete in pratica confronta la propria uscita con quella desiderata che è contenuta nell'esempio fornito. Lo scarto tra l'uscita reale della rete e quella desiderata viene utilizzato per aggiornare il valore dei pesi della rete. In particolare per ogni esempio viene valutato l'errore dell'unità di uscita che ha sbagliato maggiormente; quindi viene valutato l'errore relativo a tutti gli esempi forniti considerando il massimo tra gli errori delle unità di uscita che hanno sbagliato maggiormente.

Segue una fase di *back-propagation* in cui il segnale di errore viene utilizzato per modificare i valori dei coefficienti di connessione delle linee che vanno dalle unità nascoste a quelle dello strato di uscita e di quelli relativi alle linee che vanno dallo strato di ingresso alle unità nascoste.

Alla fine della fase di apprendimento<sup>18</sup> l'errore può scendere al di sotto di determinati valori ritenuti accettabili e che consentono quindi di ritenere che la rete sia stata in grado di apprendere.

E' da osservare che la rete neurale sopra descritta è di fatto costituita da tutti gli algoritmi matematici di apprendimento e di produzione. In pratica la rete appare all'utente graficamente costituita come un insieme di nodi (vedi figure precedenti) e di procedure matematiche opportunamente programmate (spesso anche ad oggetti) che ne rendono l'uso interattivo e apparentemente semplice.

Ciò costituisce un grande vantaggio rispetto ai modelli *fuzzy* in quanto non viene richiesto una particolare conoscenza matematica del problema ma si sappia applicare la rete neurale come un normale strumento di calcolo per risolvere un particolare problema.

Descritto sommariamente il processo di apprendimento, per una trattazione analitica e dettagliata del quale si rimanda alla letteratura sull'argomento, va precisato che gli esempi da fornire alla rete devono essere numericamente e qualitativamente significativi in modo da rappresentare correttamente il problema.

Bisogna pertanto evitare di fornire alla rete esempi anomali (cioè non correlati da un rapporto causa effetto) o numericamente insufficienti. La rete neurale che parte da una configurazione iniziale arbitraria, se l'apprendimento è corretto, convergerà verso una diversa configurazione che determinerà la capacità di risolvere il problema.

I pesi vengono conservati ai valori raggiunti (che rappresentano la combinazione ottimale) e la rete funzionerà in fase di regime con la sola legge di attivazione. E' possibile, ovviamente, che la rete non riesca ad apprendere e ciò può dipendere, oltre che dai *pattern* di *learning*, da diversi motivi come ad esempio la configurazione scelta, il tipo di funzione di attivazione, ecc. In tal caso la rete raggiunge uno stato finale non significativo oppure può manifestare un comportamento oscillatorio.

---

<sup>18</sup> Per brevità si omettono le relazioni matematiche qui sommariamente descritte.

Una rete neurale mostra quindi la capacità di apprendimento in quanto non si limita a memorizzare o, se si vuole, “*imparare a memoria*” determinati dati (cosa che fanno i database) ma riesce a fornire risposte anche in presenza di dati non memorizzati o di situazioni nuove.

Per valutare la capacità di generalizzazione di una rete neurale, cioè la capacità della rete di fornire risposte corrette in presenza di esempi non conosciuti, si può procedere nel seguente modo.

La rete viene allenata mediante i *pattern di learning* che, come già detto, vengono costruiti con una parte significativa dei dati a disposizione. Supposto che la rete addestrata abbia dimostrato di essere in grado di apprendere, vengono conservati i pesi e ad essa vengono forniti dei *pattern*, noti all’operatore ma ignoti alla rete durante la fase di apprendimento, costruiti con altri dati a disposizione.

Le prestazioni della rete possono essere valutate in base all’errore quadratico medio mostrato nella fase di test. E’ evidente che conviene scegliere, come fatto per i *pattern di learning*, i *pattern di test* in modo da costruire dei campioni sufficientemente rappresentativi delle caratteristiche dell’universo da cui sono estratti.

## 12.9.2. I MODELLI NEURALI ACUSTICI

Per la valutazione dei modelli neurali sono state implementate diverse topologie di reti, ovvero sono stati considerati diversi modelli ingresso-uscita.

Questo ha permesso di raggiungere un duplice obiettivo: definire il modello con le prestazioni migliori e individuare le variabili che caratterizzano il sistema.

A tale scopo è stata messa a punto una strategia di lavoro che, partendo da modelli semplificati, giungesse a modelli più complessi. In particolare i modelli considerati sono stati:

### Modello 1

Modello avente come ingressi il numero di veicoli e le dimensioni della sezione stradale.

Per esso la relazione tra ingressi e uscita, costituita dall’ $L_{eq}$ , assume la seguente forma:

$$L_{eq} = f(n_a, n_m, n_c, h_1, h_2, l)$$

essendo:

$n_a$  il numero di autoveicoli transitati nell’intervallo di misura;

$n_m$  il numero di motoveicoli transitati nell’intervallo di misura;

$n_c$  il numero di mezzi pesanti transitati nell’intervallo di misura;

$h_1$  l’altezza dell’ostacolo eventualmente presente sul lato della sede stradale in cui è stato posizionato il fonometro;

$h_2$  l’altezza dell’ostacolo eventualmente presente sul lato della sede stradale opposto a quello in cui è stato posizionato il fonometro;

$l$  la distanza tra gli ostacoli (di norma le facciate di edifici) ai lati della sede stradale per le tipologie ad U, la distanza tra l’ostacolo e il margine opposto della sede stradale per le tipologie ad L, la larghezza complessiva della sede stradale nel caso di tipologie aperte.

### Modello 2

Modello avente come ingressi il numero di veicoli, le dimensioni della sezione stradale, e la pendenza stradale. Per esso la relazione tra ingressi e uscita, costituita dall’ $L_{eq}$ , assume la seguente forma:

$$L_{eq} = f(n_a, n_m, n_c, h_1, h_2, l, i)$$

essendo:

$n_a, n_m, n_c, h_1, h_2, l$  già definiti;  
 $i$  la pendenza stradale.

### Modello 3

Modello avente come ingressi il numero di veicoli, le dimensioni della sezione stradale, la pendenza stradale e il tipo e il grado di manutenzione della pavimentazione stradale. Per esso la relazione tra ingressi e uscita, costituita dall' $L_{eq}$ , assume la seguente forma:

$$L_{eq} = f(n_a, n_m, n_c, h_1, h_2, l, i, p)$$

essendo:

$n_a, n_m, n_c, h_1, h_2, l, i$  già definiti;

$p$  un coefficiente che valuta il tipo e il grado di manutenzione della pavimentazione stradale.

Dai dati utilizzati per l'addestramento delle reti neurali sono stati eliminati, come già evidenziato, quelli ritenuti atipici (cioè non correlati al rumore urbano), quali il passaggio di autoveicoli dotati di sirena, il suono di campane, etc.

Le misure scartate, dalle 459 effettuate, sono state 42 e quindi quelle utilizzate sono state 417. Basandosi sulle precedenti equazioni i pattern impiegati assumono quindi, rispettivamente per i modelli 1), 2) e 3), le seguenti forme:

$$P: [n_a | n_m | n_c | h_1 | h_2 | l | | L_{eq}]$$

$$P: [n_a | n_m | n_c | h_1 | h_2 | l | i | L_{eq}]$$

$$P: [n_a | n_m | n_c | h_1 | h_2 | l | i | p | L_{eq}]$$

Non sono stati previsti modelli relativi a particolari tipologie di sezioni stradali perché, considerato il numero di misure complessivamente effettuate, i dati disponibili per ciascuna delle possibili tipologie non sarebbero stati sufficientemente numerosi.

Come già detto, gli esempi da utilizzare nell'allenamento delle reti neurali devono essere infatti sufficientemente numerosi e rilevanti al fine di rappresentare esaurientemente il problema. Sono stati impiegati *perceptroni* multistrato aventi quindi per i modelli 1, 2 e 3 rispettivamente 6, 7 e 8 neuroni d'ingresso e un neurone di uscita; si sono adottate sempre reti con un solo strato di neuroni nascosti. In letteratura sono stati proposti numerosi metodi per stimare il numero di neuroni nascosti, ma nessuno ha fornito risultati soddisfacenti.

Al fine di ricercare la configurazione di rete migliore sono stati allenati, per ogni modello, 24 *perceptroni* multistrato con uno strato di neuroni nascosti corrispondenti, ciascuno, ad un numero di neuroni nascosti variabile, a multipli di 5, da 5 a 120. Per tutte le reti allenate sono state successivamente verificate le prestazioni. Le configurazioni considerate sono state quindi:

N-6,h,1

N-7,h,1

N-8,h,1

con  $h=5(i+1)$  per  $i=0,1,2,\dots,23$ .

I criteri con cui, per ciascuno dei modelli considerati, è stata definita la migliore configurazione di rete verranno esposti successivamente. Va osservato che la dimensione dello strato intermedio influenza molto le prestazioni della rete.

Su questo strato è infatti basata la capacità di generalizzazione della rete; tuttavia se il numero di neuroni hidden è ridondante si appesantisce inutilmente la fase di apprendimento e, d'altra parte, la capacità di generalizzazione della rete può risultare peggiore di quella relativa a reti con un minore numero di neuroni nascosti.

Com'è usuale i neuroni di ingresso hanno una funzione di attivazione lineare, mentre per i neuroni nascosti e per quelli di uscita è stata utilizzata la funzione di attivazione *sigmoidale*.

Tutte le reti neurali utilizzate sono state allenate effettuando 10.000 cicli. Dei 417 pattern prescelti per l'analisi neurale e ricavati dalle misure, 226 sono stati utilizzati per addestrare le reti e i rimanenti 121 per la fase di test; i due insiemi di dati sono stati costruiti prendendo alternativamente i dati disponibili (rispettivamente, per i 9 dati relativi di norma a ciascuna stazione, 5 e 4 dati).

Sono stati impiegati perceptroni multistrato aventi quindi, per i modelli 1), 2) e 3), rispettivamente 6 (vedi figura 11), 7 e 8 neuroni d'ingresso (facilmente estrapolabili dalla rete a 6 neuroni di ingresso) e un neurone di uscita; si sono adottati comunque sempre reti con un solo strato di neuroni nascosti. Al fine di ricercare la struttura di rete ottimale si sono allenate per ciascun modello 24 diverse reti corrispondenti ciascuna a un numero di neuroni nascosti variabile, a multipli di 5, da 5 a 120.

Definiti i pattern è stato necessario procedere alla normalizzazione dei dati. Si è istituita una scala numerica tra 0 e 1 e i dati sono stati normalizzati in modo che tutti i valori rientrassero all'interno di tale scala. È importante precisare che la normalizzazione è stata effettuata per gruppi di dati omogenei; ciò significa che, ad esempio, i dati relativi ai veicoli transitati nell'intervallo di misura sono stati normalizzati diversamente da quelli relativi agli  $L_{eq}$ .

In particolare si è proceduto nel seguente modo. Poiché nell'intervallo di misura (10 minuti) il numero di autoveicoli è stato dell'ordine delle centinaia e non ha mai superato il migliaio, si è diviso tale numero per 1000. Per uniformità si è pure diviso per 1000 il numero di motoveicoli e di mezzi pesanti sebbene il numero di questi ultimi non abbia mai superato le 100 unità.

I valori relativi alla geometria delle sezioni stradali e cioè  $h_1$ ,  $h_2$  ed  $l$ , essendo dell'ordine di grandezza delle decine di metri, sono stati normalizzati dividendoli per 100.

Sempre per 100 sono stati divisi i valori di  $L_{eq}$  e, per il modello 2, i valori di pendenza stradale (originariamente espressi in valori percentuali). Infine per il modello 3 sono stati divisi per 10 i valori, compresi tra 0 e 10, attribuiti al parametro  $f$ .

Normalizzati i dati sono state quindi costruite, per ogni modello, due matrici rispettivamente per la fase di allenamento e quella di test. Per il modello 1 è stata costruita una prima matrice di 226 righe e 7 colonne: le righe costituiscono i pattern di learning e le colonne sono relative, le prime 6, alle unità di ingresso e, l'ultima, a quella di uscita.

La seconda matrice ha invece dimensione 191x7: le righe costituiscono i pattern di test e per le colonne vale quanto detto prima. In entrambi i casi la prima colonna è relativa al numero di autoveicoli, la seconda al numero di motoveicoli, la terza al numero di mezzi pesanti, la quarta ad  $h_1$ , la quinta ad  $h_2$ , la sesta ad  $l$  e la settima all' $L_{eq}$ .

In modo analogo si è proceduto per i modelli 2 e 3. In particolare per il modello 2 si sono costruite per la fase di learning e di test due matrici aventi dimensioni rispettivamente 226x8 e 191x8.

La definizione delle righe e delle colonne è la stessa del modello 1 con la sola differenza che, in questo caso, le settime colonne sono relative alla pendenza stradale e le ottave colonne, riferite alle unità di uscita, sono relative all' $L_{eq}$ .

Infine per il modello 3 si sono costruite due matrici di dimensioni 226x9 e 191x9 in cui il significato delle righe e delle colonne rimane lo stesso del modello 2 con la sola differenza che le ottave colonne sono relative al parametro  $f$  e le nove colonne, riferite alle unità di uscita, sono relative all' $L_{eq}$ .

	<i>learning</i>	<i>test</i>
modello 1	226x7	191x7

modello 2	226x8	191x8
modello 3	226x9	191x9

Tabella 32: dimensioni delle matrici impiegate in fase di learning e di test per ciascuno dei modelli considerati.

La Tabella 32 riassume le dimensioni delle matrici costruite; tali matrici non sono qui riportate per economia di spazio. Anche per i dati relativi alla città di Messina si è proceduto ad eliminare quelli relativi a misure in cui si sono verificati eventi atipici. Le misure eliminate, dalle 135 effettuate, sono state 23 e quindi le misure utilizzate e i corrispondenti dati sono stati 112.

I pattern impiegati assumono anche in questo caso, rispettivamente per i modelli 1, 2 e 3, le strutture citate per Catania. Poiché i pattern utilizzabili non sono molto numerosi, come detto sono infatti 112, invece di procedere come per Catania suddividendoli alternativamente per costruire i pattern di learning e di test, si è proceduto estraendo da essi due pattern per l'allenamento e uno per la fase di test.

Anche in questo caso i pattern sono stati costruiti facendo in modo che le misure relative ad ogni stazione si distribuissero tra i pattern di learning e di test seppure, in questo caso, mediamente con un rapporto di 2 a 1.

Procedendo nel modo descritto si sono potuti utilizzare per l'allenamento delle reti 75 pattern, mentre 37 sono stati impiegati per verificare le prestazioni delle reti allenate. Definiti i pattern si è proceduto a normalizzare i dati adottando i criteri già illustrati per i dati relativi alle misure effettuate a Catania.

Nella Tabella 33 sono riportate le dimensioni delle matrici, costruite con i dati normalizzati, relative alle fasi di learning e di test e a ciascuno dei modelli considerati.

Sulla definizione delle righe e delle colonne si rimanda a quanto detto per Catania.

	learning	test
modello 1	75x7	37x7
modello 2	75x8	37x8
modello 3	75x9	37x9

Tabella 33: dimensioni delle matrici impiegate in fase di learning e di test per ciascuno dei modelli considerati.

Anche in questo caso le 6 matrici non sono qui riportate per economia di spazio.

### 12.9.3. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI NEURALI PER CATANIA

Le reti neurali allenate, relative a tutte le configurazioni sopra considerate, presentando valori dell'errore quadratico medio (*msa*) sufficientemente bassi (< 2%), hanno dimostrato di essere state in grado di apprendere efficacemente.

Le configurazioni migliori sono state determinate in base allo *msa* presentato in fase di learning e soprattutto di test, essendo quest'ultimo maggiormente significativo in relazione alla capacità delle reti di rispondere correttamente in presenza di pattern estranei al set di apprendimento. Con riferimento ai modelli 1) e 3) le reti migliori si sono dimostrate quelle con 35 neuroni nascosti (hidden), mentre con riferimento al modello 2) la rete migliore è risultata essere quella con 50 neuroni nascosti.

Le reti con un maggior numero di neuroni nascosti, pur presentando un minore *msa* in fase di learning, hanno infatti mostrato un aumento dello *msa* in fase di test a conferma della loro minore capacità previsionale. Non esiste una regola univoca per la determinazione del numero di neuroni nascosti: occorre evitare che la rete neurale si organizzi in modo mnemonico e non di vero apprendimento.

In pratica se le locazioni di memoria sono superiori ai casi di *learning* questi vengono memorizzati “*sic et simpliciter*”. I valori dello *msa* in fase di apprendimento e di test sono stati per le reti migliori:

$msa_{(learning)} = 0.0182$	$msa_{(test)} = 0.0177$	rete 1) ( $N^2_{6,35,1}$ )
$msa_{(learning)} = 0.0182$	$msa_{(test)} = 0.0181$	rete 2) ( $N^2_{7,50,1}$ )
$msa_{(learning)} = 0.0177$	$msa_{(test)} = 0.0175$	rete 3) ( $N^2_{8,35,1}$ )

Gli andamenti dei valori dello *msa* relativi ai tre modelli e a tutte le configurazioni di reti mostrati in , presentano un trend comune che evidenzia comportamenti coerenti e simili dei tre modelli considerati.

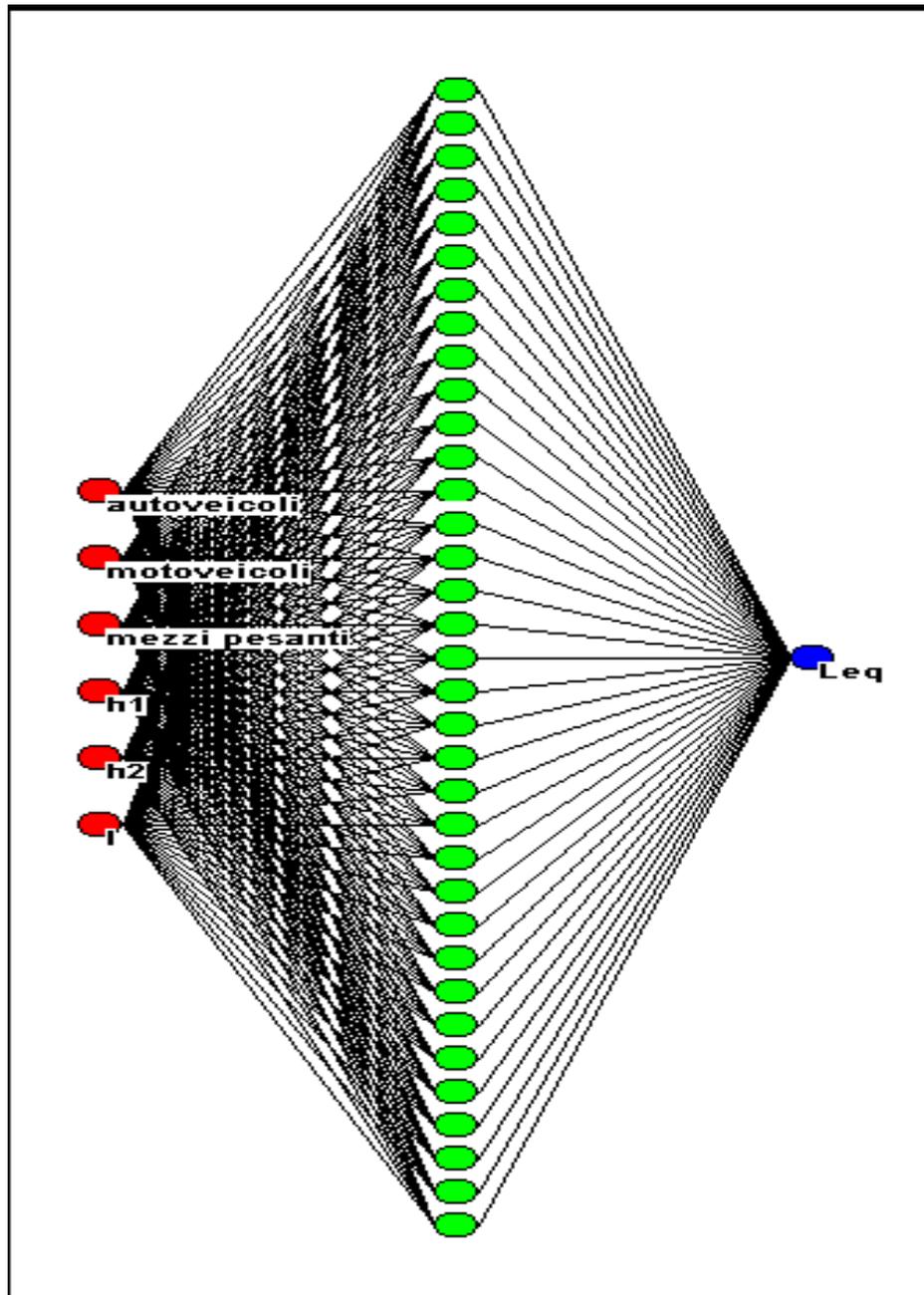


Figura 153: Rete neurale per analisi del rumore a 6 variabili di input e 1 di output

In Figura 155 è riportato il confronto tra i valori di  $L_{eq}$  misurati e quelli ottenuti in fase di test con i modelli neurali proposti. Al fine di valutare in che misura le variabili presenti nei modelli più complessi ne migliorassero le prestazioni e valutare conseguentemente in tal modo anche il modello migliore, si sono considerate, per i tre modelli, le reti con 35 neuroni nascosti e ad esse si

sono forniti degli insiemi di pattern opportunamente costruiti; ciascun insieme è stato riferito a determinate variazioni delle grandezze di ingresso. Si sono tenute costanti, ai valori medi, alcune grandezze, facendone variare altre.

In particolare, tra le possibili combinazioni, si sono mantenute costanti, ai valori medi riferiti alle strade con tipologia ad U (cioè con edifici in entrambi i lati), il numero di moto, il numero di mezzi pesanti, la larghezza della sede stradale, la pendenza (per il modello 2)) e il tipo e grado di manutenzione della pavimentazione stradale (per il modello 3)) e fatti variare linearmente, dal valore minimo al valore massimo, il numero di autovetture avendo fissato un valore di altezza degli edifici (sono stati considerati i casi con  $h_1 = h_2 = 10$  m ed  $L = 15$  m).

I risultati ottenuti, mostrati in Figura 156, evidenziano che i tre modelli, che correttamente prevedono un aumento dell'Leq al crescere del numero di auto, si differenziano poco.

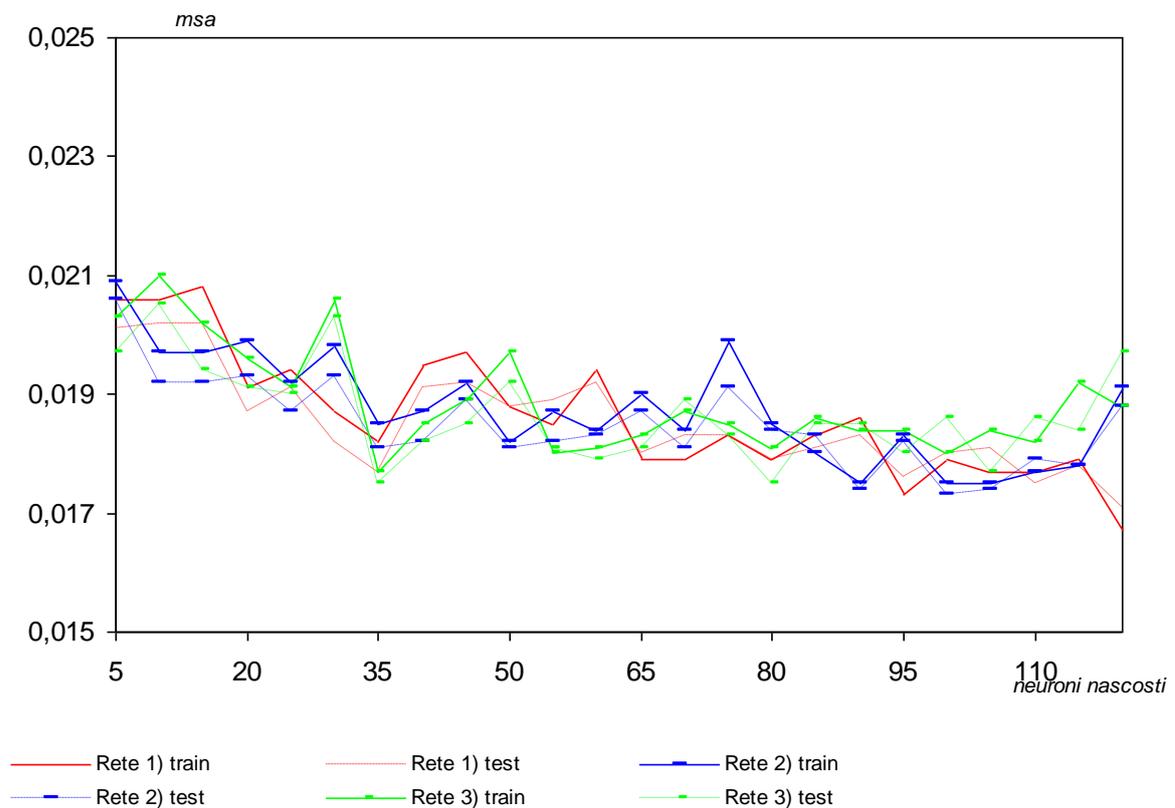


Figura 154 - Valori di  $msa$  per i diversi modelli in funzione del numero di neuroni nascosti

Ciò è in accordo con la sostanziale uniformità dei parametri aggiuntivi presenti nei modelli 2) e 3) dovuta al fatto che la rete viaria di Catania presenta modeste pendenze (2,3% in media) e che la maggior parte delle strade in cui sono state ubicate le stazioni di misura presenta un fondo asfaltato e in buone condizioni.

Altre combinazioni che presentavano diverse variazioni delle grandezze di ingresso hanno confermato tali risultati.

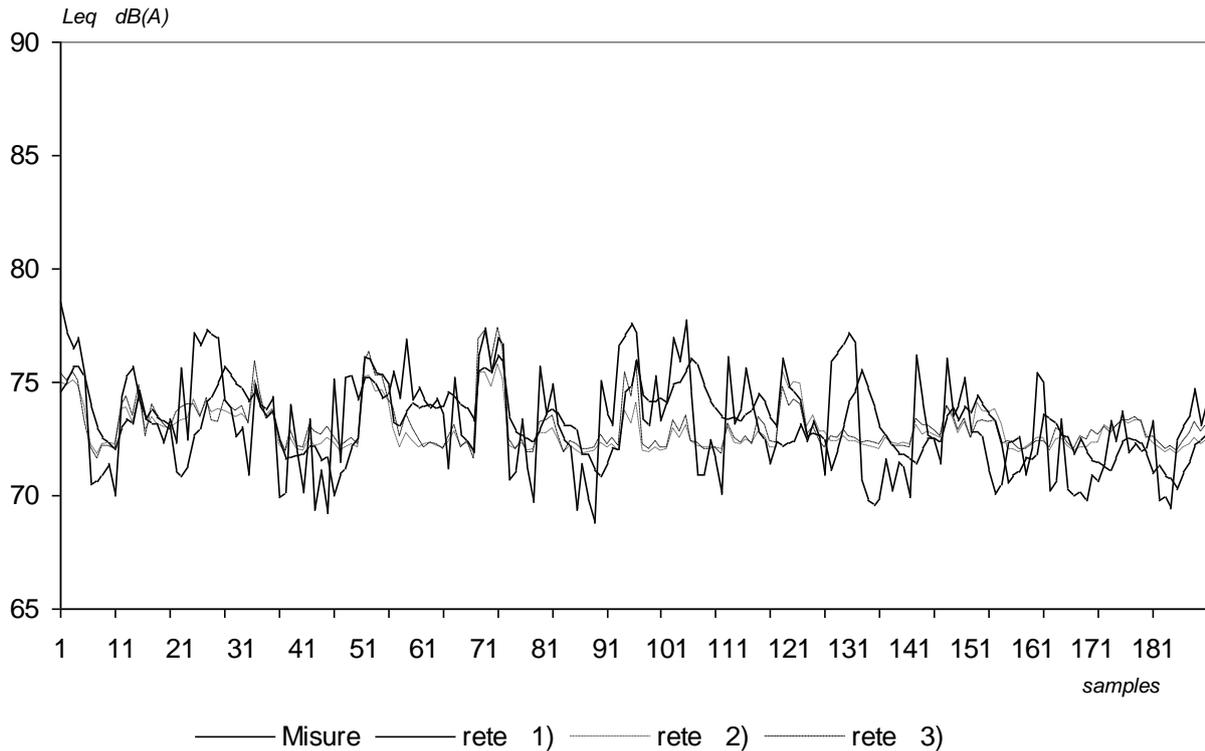


Figura 155- Confronto tra i valori di  $L_{eq}$  misurati con quelli ottenuti in fase di test con i modelli neurali

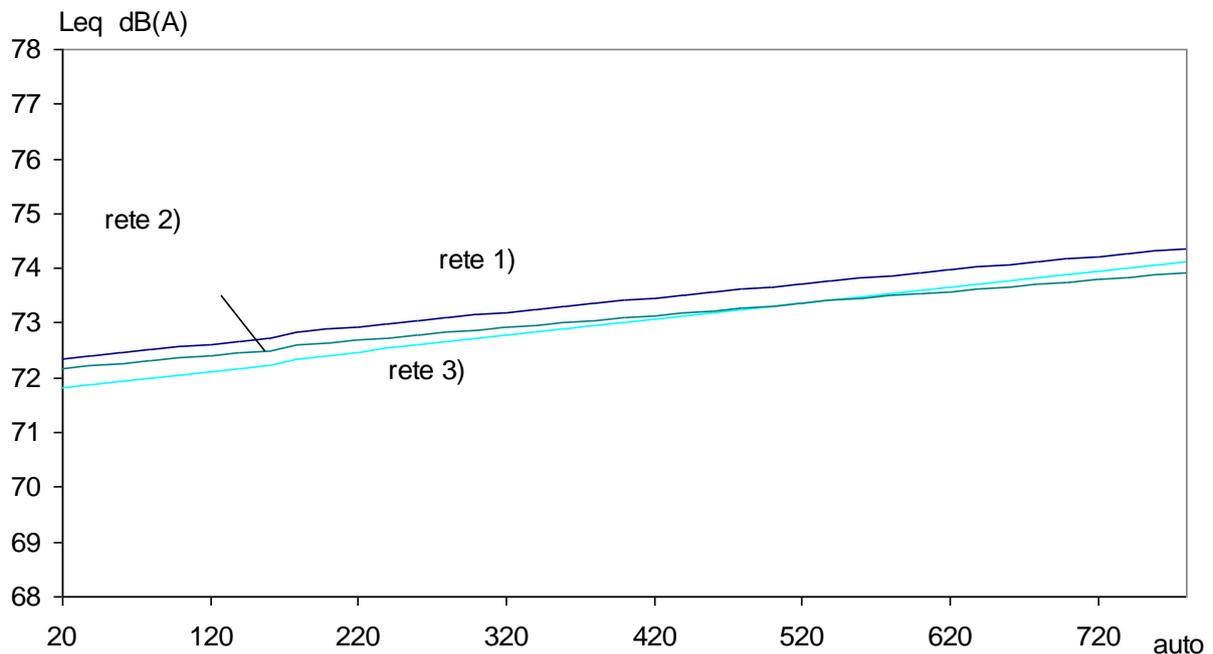


Figura 156: Variazione del  $L_{eq}$  in funzione del numero di auto nei modelli esaminati

#### 12.9.4. RISULTATI OTTENUTI PER LA CITTÀ DI MESSINA

Le reti allenate, pur disponendo di un minor numero di *pattern* di learning rispetto a Catania, hanno dimostrato di essere in grado di apprendere. La valutazione delle migliori configurazioni di rete per ciascuno dei modelli è stata effettuata considerando il valore di *msa* in fase di *learning* e soprattutto, per le motivazioni già espresse, in fase di *test*.

Con riferimento alle tre configurazioni prima descritte, le reti migliori sono risultate rispettivamente quelle con  $h=85$ ,  $h=85$  ed  $h=90$ . Relativamente al modello 1 va precisato che esistono reti con valori di  $msa$  lievemente minori di quello relativo alla rete prescelta come migliore ( $N^2_{6,85,1}$ ); tali reti hanno tuttavia un numero di neuroni *hidden* elevato.

I valori di  $msa$  in fase di *learning* e di *test* per ciascuna delle reti migliori relative ai tre modelli sono riportate nella *Tabella 34*.

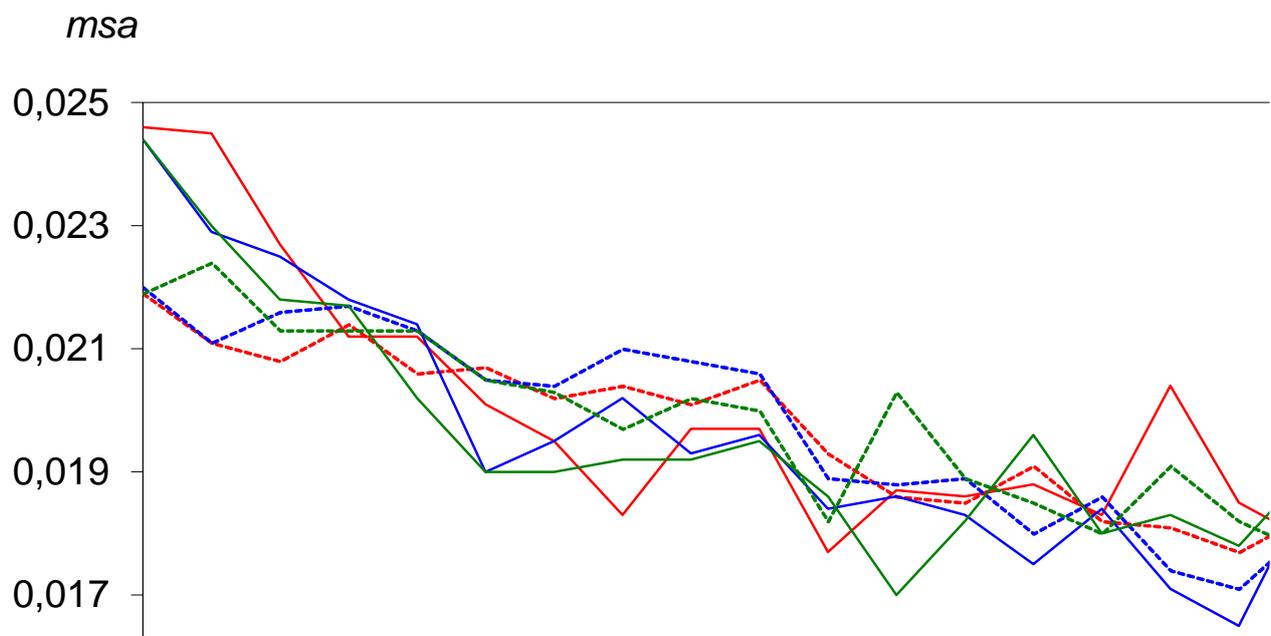
$msa_{(learning)} = 0.0178$	$msa_{(test)} = 0.0177$	modello 1	( $N^2_{6,85,1}$ )
$msa_{(learning)} = 0.0165$	$msa_{(test)} = 0.0171$	modello 2	( $N^2_{7,85,1}$ )
$msa_{(learning)} = 0.0179$	$msa_{(test)} = 0.0177$	modello 3	( $N^2_{8,90,1}$ )

*Tabella 34: valori dello  $msa$  in fase di test e di apprendimento per le reti con la migliore configurazione per i 3 modelli.*

*Nella*

Figura 157 è riportato invece l'andamento dei valori dello  $msa$  sia in fase di *learning* che di *test* per tutte le reti considerate al fine di giungere a quelle con la migliore configurazione. Dal confronto con la corrispondente Figura 155 relativa a Catania, emergono, soprattutto per le configurazioni di reti con un numero di neuroni *hidden* inferiore a 60, valori di  $msa$  mediamente più elevati. Nella Figura 158 sono messi a confronto i valori di  $L_{eq}$  misurati con i valori ottenuti dalle migliori reti neurali di ciascun modello in fase di *test*. La linea a tratto spesso si riferisce all'andamento dei valori di  $L_{eq}$  misurati mentre le linee a tratto fine si riferiscono alle approssimazioni fornite dalle reti.

La figura mostra che, sebbene, come avvenuto per Catania, gli andamenti stimati non si sovrappongono esattamente a quello misurato, le reti neurali presentano delle buone capacità di approssimazione.



*Figura 157: valori di  $msa$  in funzione del numero di neuroni nascosti.*

Si è tentato di valutare in che misura i modelli riferiti ad una determinata città, caratterizzata da una specifica struttura edilizia e stradale e da una determinata tipologia di traffico veicolare, potessero essere utilizzati per altre città.

A tal proposito si sono testati i migliori modelli di Catania con i dati di Messina.

Va osservato che l'impianto urbanistico di Messina, città ricostruita quasi interamente dopo il catastrofico terremoto del 1908, è caratterizzato da strade larghe con edifici bassi (di norma con due o tre piani), ben diverso quindi da quello di Catania molto più diversificato.

Anche il tipo di traffico veicolare delle due città è sensibilmente diverso, presentando Messina flussi veicolari minori; fanno eccezione particolari arterie stradali in cui si registra un elevato traffico di veicoli, soprattutto di mezzi pesanti, diretti al porto per effettuare il traghettamento sullo stretto di Messina.

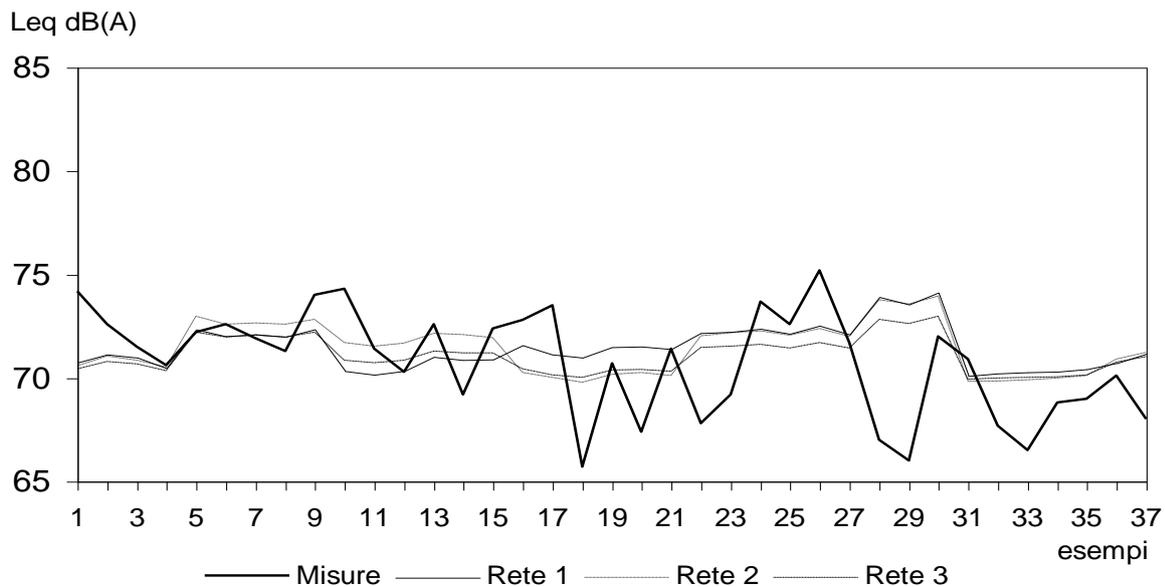


Figura 158: confronto tra le misure e le stime effettuate dalle reti per Messina

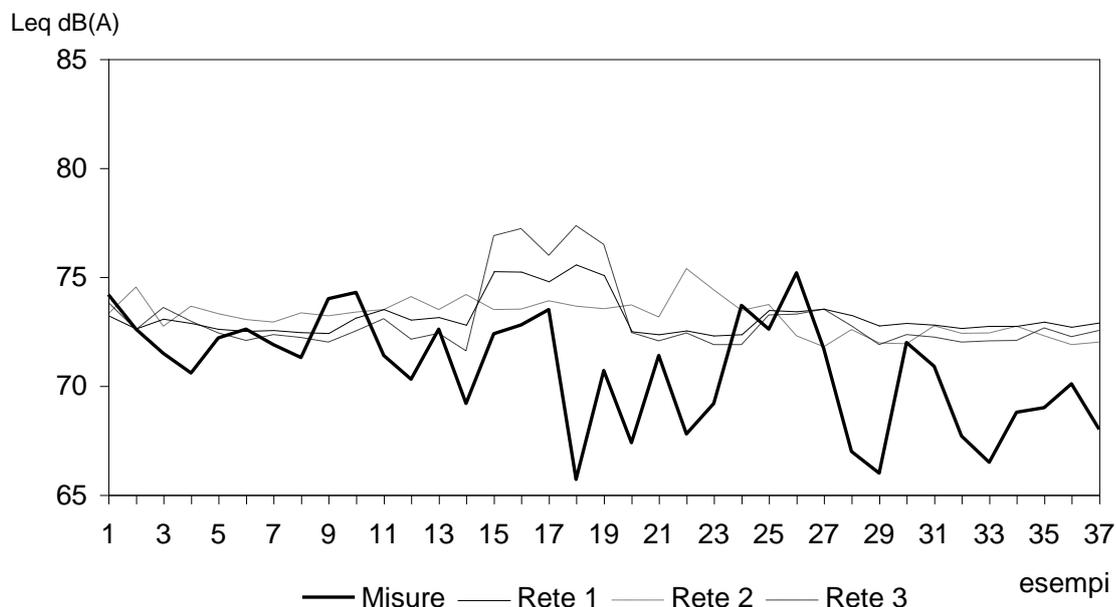


Figura 159: confronto tra le misure di Messina e le stime effettuate dalle reti di Catania.

Sono state quindi allenate le migliori reti di Catania con i pattern di *learning* di Catania e si sono testate con i pattern di test di Messina.

In Figura 159 è riportato il confronto tra i valori di  $L_{eq}$  misurati a Messina e quelli ottenuti in fase di test con i modelli relativi a Catania.

La linea continua a tratto spesso si riferisce all'andamento dei valori di  $L_{eq}$  misurati mentre le linee a tratto sottile si riferiscono alle approssimazioni fornite dalle reti.

E' possibile rilevare, confrontando le curve di Catania e Messina, che le capacità delle reti di Catania a stimare le misure di Messina (appartenenti all'insieme di test) sono sensibilmente peggiori rispetto quelle delle reti di Messina.

## 12.10. I MODELLI BIDIMENSIONALI DI PREVISIONE DEL RUMORE

Come osservato i modelli neurali, utilizzando le misure e i dati rilevati sulle arterie stradali, sono stati impiegati prevalentemente per ottimizzare gli interventi di risanamento acustico in tali siti e per tale loro caratteristica possono essere definiti "monodimensionali".

Trovata la tipologia migliore di rete, è possibile, ad esempio, determinare, con tempi di calcolo ridottissimi, per una qualsiasi strada di cui sono note le caratteristiche, l'intensità e la tipologia del flusso veicolare che consentano di non superare un fissato livello di rumorosità. Tale capacità si rivela particolarmente utile in ambito urbano, dove interventi di limitazione o interdizione del traffico veicolare o di determinate categorie di veicoli, rappresentano spesso soluzioni obbligate per la difficoltà di ricorrere ad altri tipi di intervento come la posa di barriere acustiche.

Volendo estendere l'utilizzo di modelli previsionali ad aree di grande estensione, si è fatto ricorso a modelli "bidimensionali", utilizzando un programma di previsione a tracciamento inverso dei raggi (*Mithra*<sup>®</sup> vers. 2.1 della *01dB*) che consente di prevedere i livelli di rumore in siti urbani complessi, di redigere delle mappe di rumore e di ottimizzare alcune soluzioni di protezione acustica come le barriere, i terrapieni e gli asfalti fonoassorbenti.

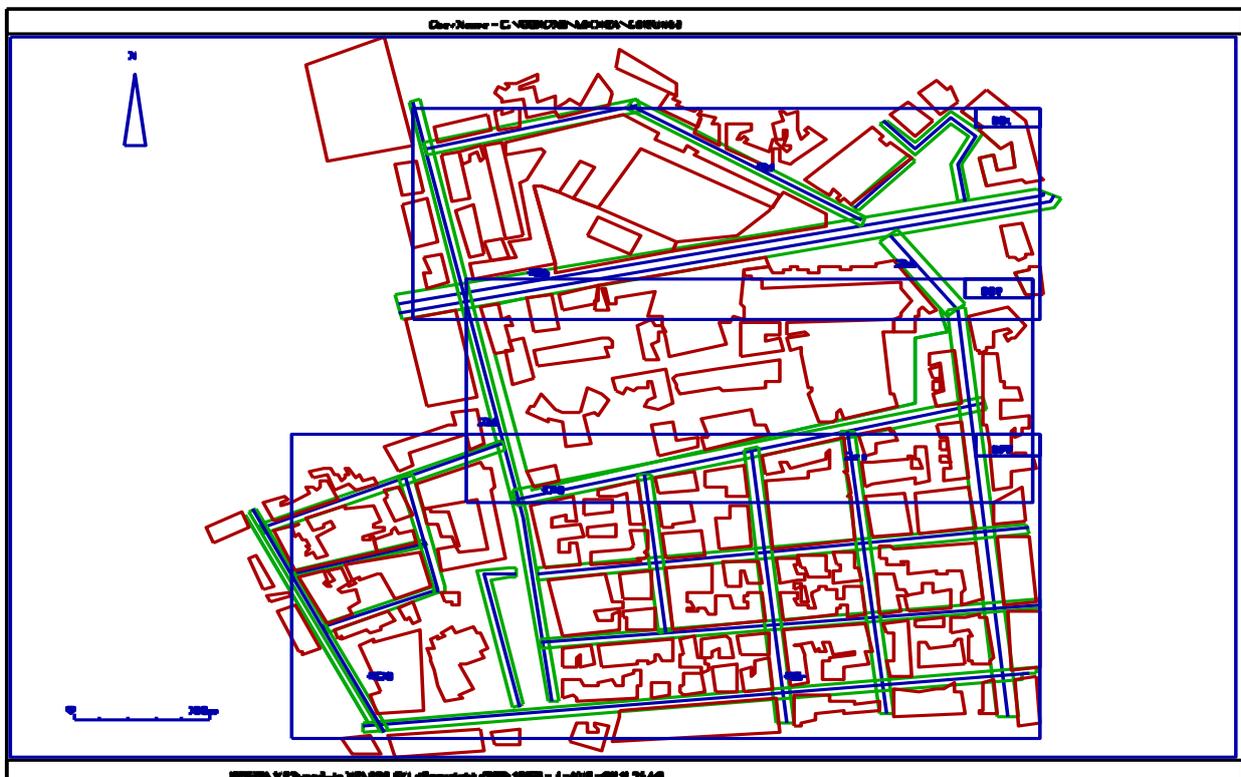


Figura 160 – Mappa dell'area di studio di Catania utilizzata per il modello bidimensionale

Il programma è costituito da moduli che consentono la raccolta dei dati e il loro controllo (*digitalizzazione* del sito, input dei punti ricettori dove si vuole il calcolo dei livelli sonori, input delle caratteristiche di traffico), la ricerca dei percorsi esistenti tra un dato punto e le vie di circolazione, l'edizione dei risultati. In particolare il programma è stato impiegato, in tempi successivi, per studiare due aree contigue del centro storico di Catania estese complessivamente per circa 35 ha, nelle quali ricadono strutture, come un'azienda Ospedaliera e numerosi plessi scolastici, per le quali si richiede un particolare grado di protezione dal rumore.

I dati relativi all'area complessiva di indagine sono stati immessi nel programma attraverso l'uso di cartografia in formato *dxf*; sono stati inseriti tutti i dati necessari come le quote del terreno e la conformazione e l'altezza degli edifici e di eventuali altri tipi di strutture. Per valutare l'affidabilità delle previsioni del *Mithra*<sup>®</sup> e potere confrontare i dati reali con quelli simulati dal programma, si è proceduto alla sua calibrazione utilizzando i rilievi sperimentali ottenuti in una campagna mirata di misure nell'area di indagine.

Ciò è stato necessario poiché gli spettri sonori considerati in fase di calcolo per le auto e camion (norme *CSTB*) non sono del tutto rispondenti alla tipologia veicolare di Catania e Messina. Il programma calcola automaticamente, in funzione dei dati immessi, la potenza sonora per metro lineare di una strada.

I dati immessi sono sia quelli topografici e geometrici, necessari per ricostruire il sito di indagine, sia quelli relativi al traffico veicolare. Sono stati inseriti nel progetto i punti di rilevazione sperimentale, assegnando ai ricettori la stessa altezza dal suolo che avevano i microfoni sul campo e cioè 1.5 m.

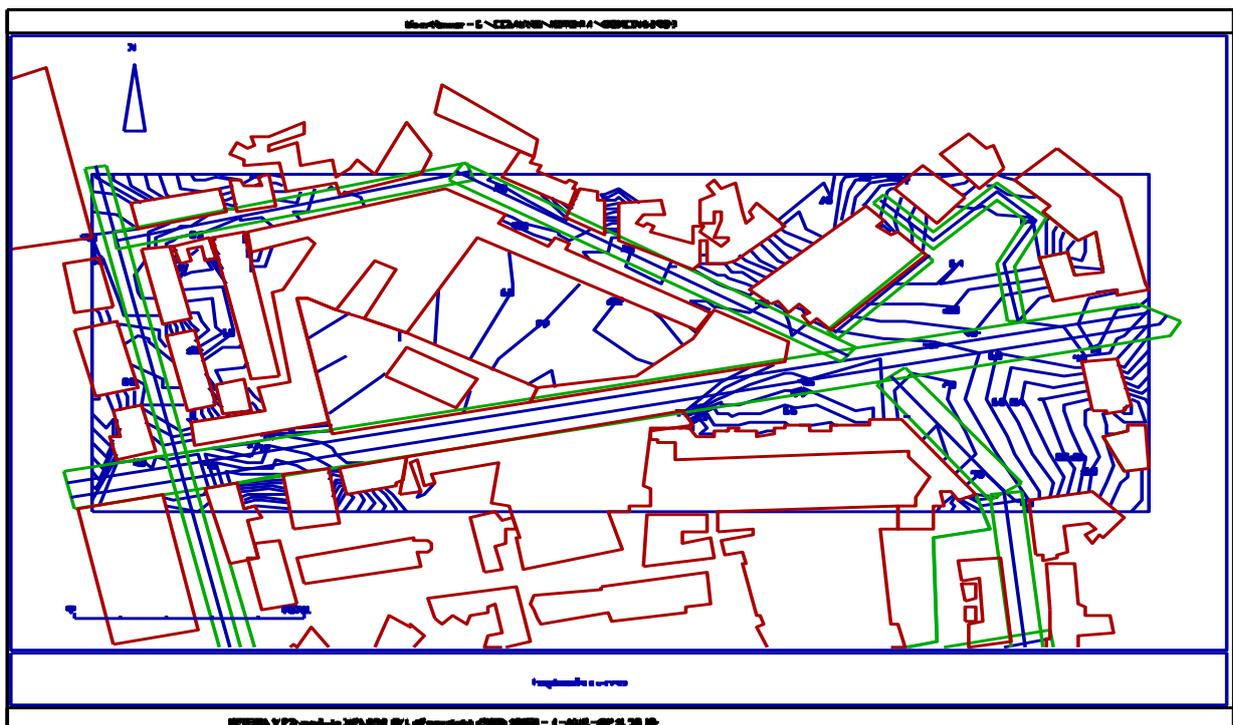


Figura 161– Distribuzione dei livelli sonori simulati nella 1° zona di calcolo.

Si è proceduto quindi al calcolo dei livelli di rumore per ogni ricettore per confrontare i dati reali misurati sul campo con quelli simulati dal programma ottenendo scarti estremamente contenuti e più che soddisfacenti per gli scopi di una simulazione acustica. Il confronto tra i valori di  $L_{eq}$  misurati e quelli simulati, nelle stazioni di misura individuate nell'area pilota, è riportato nella Tabella 35. Per ridurre i tempi di calcolo e migliorare al contempo la qualità delle simulazioni,

l'area di indagine è stata suddivisa in aree settoriali (vedi Figura 160). Le mappe di rumore sono state calcolate dal programma in ciascuna area settoriale.

La definizione di queste aree è stata effettuata facendo in modo che presentassero una certa sovrapposizione ai loro bordi per potere ricostruire, senza soluzione di continuità, la mappa di rumore per l'intera area di studio.

La distribuzione del livello di pressione sonora sul territorio è stata riportata ad una quota di 1.5 m dal suolo. Sono state stampate le mappe di rumore per linee isofoniche utilizzando una graduazione di 2 dB(A) fra le varie curve (vedi Figura 161, Figura 162 e Figura 163).

Come è noto nelle aree in cui dal confronto delle mappe di rumore con la zonizzazione acustica, effettuata secondo il D.P.C.M. 1-3-1991, emergono superamenti dei limiti stabiliti e quindi situazioni di inquinamento acustico bisogna intervenire con appropriati interventi.

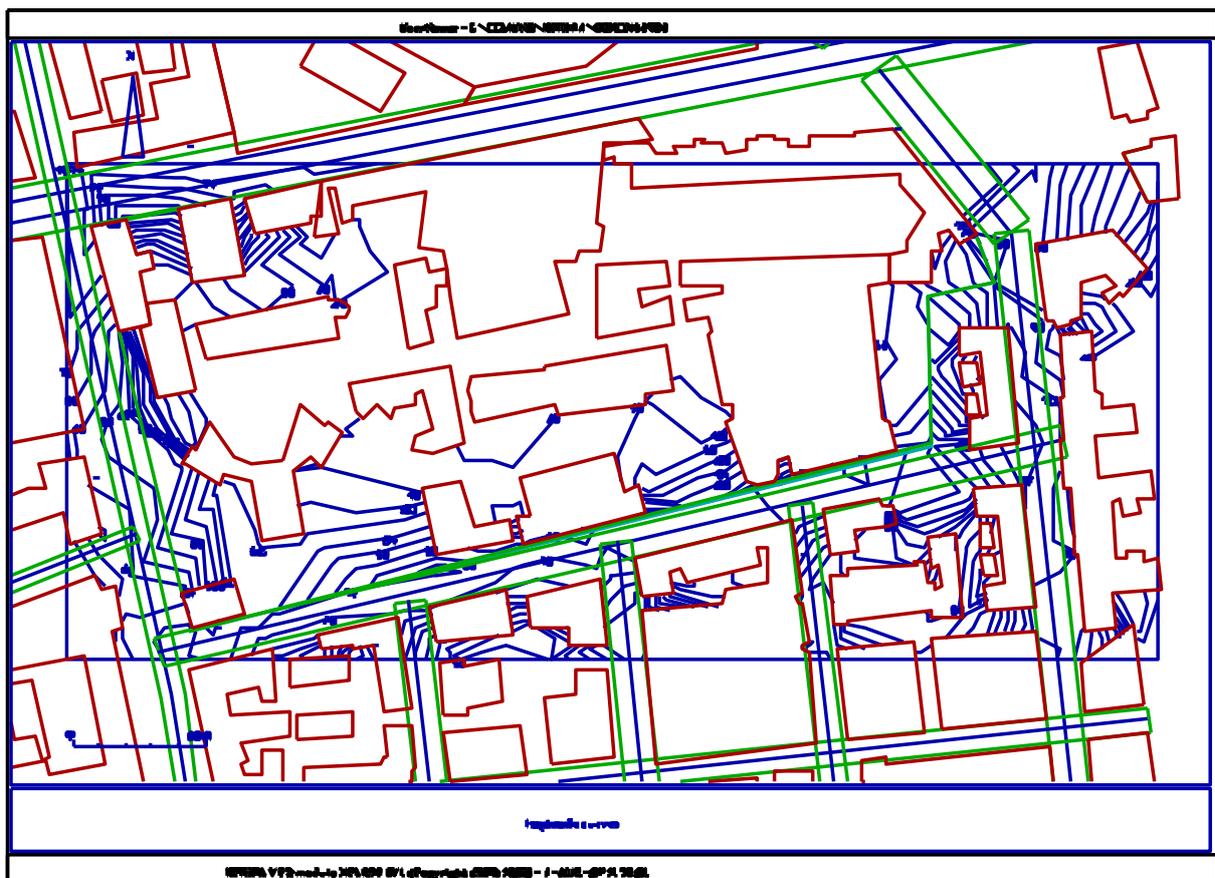


Figura 162 - Distribuzione dei livelli sonori simulati nella 2° zona di calcolo.

La zonizzazione acustica del territorio comunale di Catania è in corso di definizione, tuttavia aree come quelle ospedaliere e scolastiche del sito di indagine, sono chiaramente individuate in zona I dal citato D.P.C.M. 1-3-1991.

Per tali aree sono stati proposti dei possibili interventi di bonifica acustica, effettuando preventivamente, mediante l'impiego integrato dei modelli di previsione monodimensionali e bidimensionali, le relative simulazioni per valutarne l'efficacia.

Trattandosi di un'area urbana è stato necessario prevedere una serie di soluzioni diversificate ed integrate tra di loro. In particolare sono state proposte, ove possibile, barriere acustiche in plexiglas, interventi di regolamentazione del traffico veicolare, interventi passivi sui

ricettori, come la sostituzione di infissi con l'installazione di doppi vetri, laddove non era possibile intervenire diversamente.

Nella figura 23 è riportata la mappa dell'area di intervento studiata e comprendente un presidio ospedaliero, una scuola superiore (magistrale) ed una scuola media.

Stazioni di misura	via Adua	via Androne	via Cifali	via Dottor Consoli	via F. Filzi	via C. Forlanini	via Lago di Nicito	via Macallè	via N. Martoglio	via Mogadiscio	via Orto S. Clemente	v.le M. Rapisardi	via Rocca Romana	via Ughetti
$L_{eq}$ misurato (dBA)	64.8	73.8	75.4	70.4	70.5	72.5	70.2	63.7	70.7	68.5	71.8	72.0	71.0	70.7
$L_{eq}$ simulato (dBA)	64.4	73.1	70.9	70.4	66.0	70.0	70.1	63.9	70.9	70.9	71.8	72.0	71.7	69.9

Tabella 35- Confronto tra i valori di  $L_{eq}$  misurati e quelli simulati da Mithra nelle stazioni di rilevamento individuate nell'area pilota della città di Catania.

Nelle figure 24, 25 e 26 sono riportate le mappe dei livelli sonori ottenute con il programma di simulazione *Mithra*<sup>®</sup> e le procedure di calibrazione e di ottimizzazione sopra indicate.

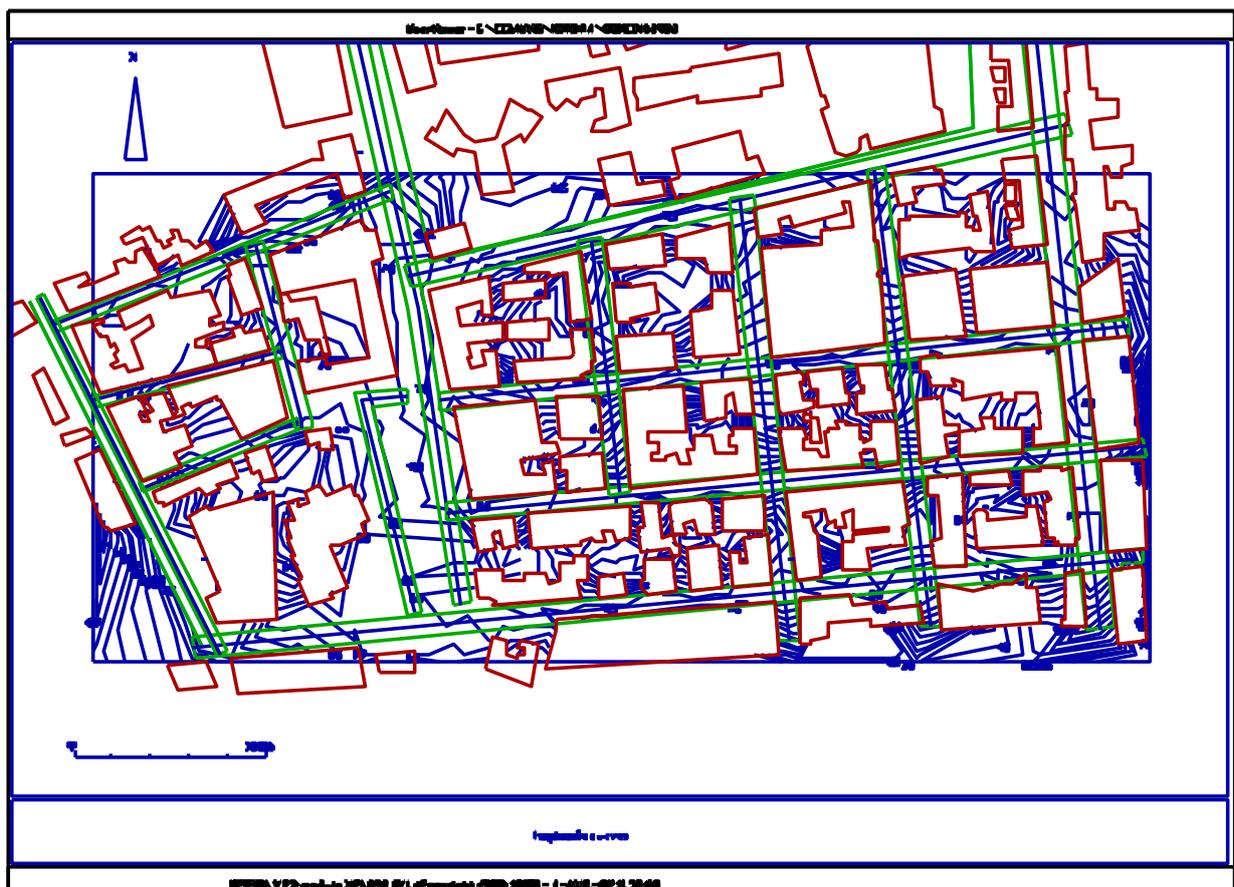


Figura 163 - Distribuzione dei livelli sonori simulati nella 3° zona di calcolo.

## 12.11. IL MODELLO DI RUMOROSITÀ BASATO SULLA FUZZY LOGIC

La *fuzzy logic* è scienza relativamente recente fondata sulle intuizioni di L. Zadeh di circa trent'anni fa. Le operazioni logico-matematiche tradizionali operano su grandezze perfettamente definite (grandezze *crisp*) e che non presentano alcuna incertezza.

La *fuzzy logic* invece considera le grandezze sulle quali opera non perfettamente definite ma affette da incertezza (appunto per questo sono dette *fuzzy*) per le quali sono indicate le funzioni di appartenenza (*membership function*) ad un insieme particolare detto *fuzzy set*, come si chiarirà nel prosieguo.

### 12.11.1. INTRODUZIONE ALLA TEORIA DEGLI INSIEMI FUZZY

La *fuzzy logic* (logica delle grandezze incerte) è stata introdotta partendo dall'osservazione che gli uomini analizzano la realtà usando in modo naturale dei qualificatori imprecisi e incerti e quindi *fuzzy*.

Questa teoria in un certo senso esprime i concetti delle filosofie orientali di incertezza, imprecisione, casualità che si contrappongono a quelli connaturati nelle filosofie occidentali di precisione e determinismo di derivazione newtoniana.

La teoria degli insiemi *fuzzy* consente di esprimere informazioni imprecise e qualitative in modo corretto ed esatto ed è una generalizzazione della normale nozione di insieme. Un insieme *fuzzy*  $A$  è una raccolta di elementi dell'universo del discorso  $U$  che condivide una caratteristica comune.

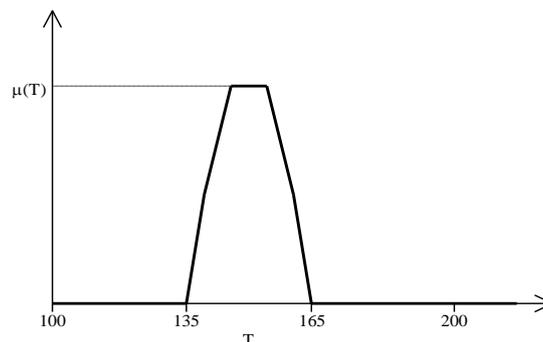


Figura 164: Definizione della funzione di appartenenza di un insieme fuzzy

L'insieme *fuzzy* è caratterizzato da una funzione di appartenenza (*membership function*) che associa ciascun elemento  $y$  di  $U$  un numero reale nell'intervallo  $[0,1]$  che rappresenta il grado di appartenenza di  $y$  in  $A$ .

Generalmente maggiore è il valore della funzione di appartenenza di  $y$  all'insieme *fuzzy*  $A$  maggiormente evidente sarà l'appartenenza all'insieme  $A$ . Si consideri il seguente esempio: si desidera definire una misura specifica linguistica della temperatura all'interno dell'intervallo chiuso  $[100, 200]$  e chiamiamo questa misura temperatura di circa  $150^{\circ}\text{C}$ .

Una funzione di appartenenza di un insieme *fuzzy* che rappresenta questo concetto è riportato nella Figura 164. Si osservi la diversità di definizione rispetto a quella classica *crisp* data in Figura 165.

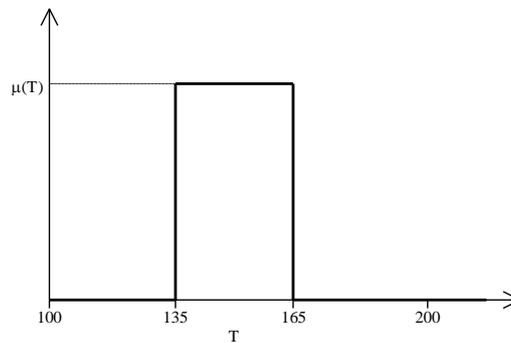


Figura 165: Rappresentazione crisp di temperatura

In pratica un insieme *fuzzy* consente di trasformare l'aspetto qualitativo di una misura in una transizione graduale della funzione di appartenenza. Alcune delle operazioni usuali degli insiemi e quindi anche degli insiemi *fuzzy* sono *AND* e *OR* che ora divengono *fuzzy AND* e *fuzzy OR*: esse sono definite, in termini delle corrispondenti funzioni di appartenenza, come segue:

$$A \cup B = \{u \in U \mid u \in A \text{ or } u \in B\}$$

$$A \cap B = \{u \in U \mid u \in A \text{ and } u \in B\}$$

$$\bar{A} = \{u \in U \mid u \notin A\}$$

Considerando la funzione caratteristica, le operazioni sopra indicate comportano le seguenti relazioni:

$$\chi_{A \cup B}(u) = \max(\chi_A(u), \chi_B(u)) = \chi_A(u) \vee \chi_B(u)$$

$$\chi_{A \cap B}(u) = \min(\chi_A(u), \chi_B(u)) = \chi_A(u) \wedge \chi_B(u)$$

$$\chi_{\bar{A}}(u) = 1 - \chi_A(u)$$

Sostituendo la funzione caratteristica con la funzione di appartenenza, si ottengono le definizioni delle operazioni di unione, intersezione negazione per gli insiemi *fuzzy*:

$$(A \cup B)(u) = \max(A(u), B(u))$$

$$(A \cap B)(u) = \min(A(u), B(u))$$

$$\bar{A}(u) = 1 - A(u)$$

E' possibile dimostrare che con le definizioni adottate continuano a valere formalmente le leggi di *De Morena* e le proprietà di assorbimento e di *idempotenza*; tuttavia nel caso dei *fuzzy* è:

$$A \cup \bar{A} \neq U$$

$$A \cap \bar{A} \neq \emptyset$$

Ciò era del resto prevedibile dato che la teoria *fuzzy* non prevede la dicotomia, caratteristica della teoria degli insiemi. Si supponga che nell'universo del discorso di una grandezza  $x$  siano definiti i due *fuzzy set*,  $x$  is *media* e  $x$  is *grande*, riportati in Figura 166.

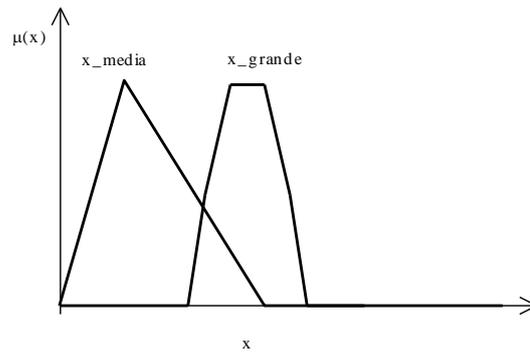


Figura 166: Funzione di appartenenza dei due fuzzy set  $x$  is media AND  $x$  is grande

In Figura 167 é riportata la funzione di appartenenza dell'insieme  $x$  is media or  $x$  is grande:

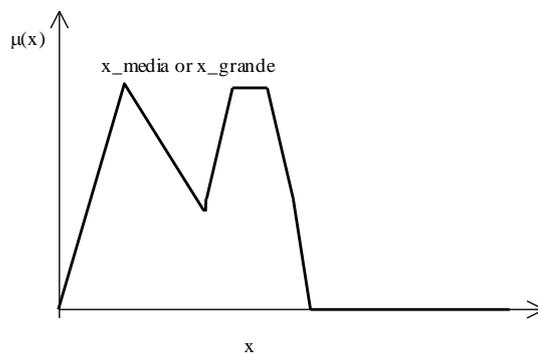


Figura 167: Funzione di appartenenza del fuzzy set,  $x$  is media OR  $x$  is grande

In Figura 168 é riportata la funzione di appartenenza per il set  $x$  is media and  $x$  is grande.

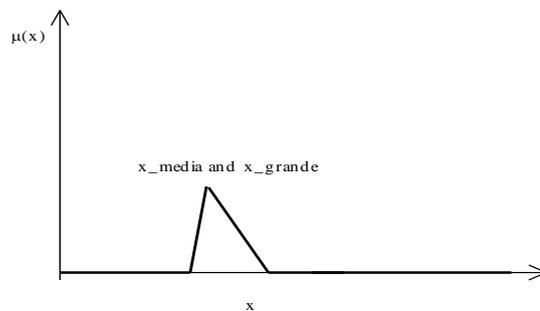


Figura 168: Funzione di appartenenza del fuzzy set,  $x$  is media and  $x$  is grande

In Figura 169 viene riportata, infine, la funzione di appartenenza per l'insieme  $x$  is not grande.

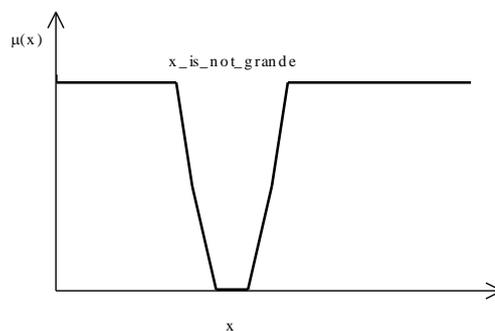


Figura 169: Funzione di appartenenza del fuzzy set  $x$  is not grande

### 12.11.2. L'IMPLICAZIONE E L'ALGORITMO FUZZY

Si è precedentemente affermato che la logica *fuzzy* viene spesso utilizzata per descrivere il comportamento di un sistema. Tale descrizione avviene utilizzando una serie di *implicazioni fuzzy* associate in modo da costituire un *algoritmo fuzzy*. Nel seguito viene data una definizione di entrambi i termini utile per le applicazioni descritte nel presente lavoro. Una *implicazione fuzzy* può essere espressa dal costrutto:

$$\text{if } x \text{ is } A \text{ then } y \text{ is } B$$

ove sia  $A$  che  $B$  sono dei *fuzzy set*. In tale espressione si riconoscono due parti distinte; il termine: *if x is A* viene detto *antecedente*, mentre la parte *then y is B* si chiama *conseguente* della regola, vedi Figura 170. Nella logica classica il risultato di un'implicazione è governato dalla regola del *Modus Ponens*: *la verità dell'implicazione dipende dalla verità della premessa*.

Sebbene nella logica introdotta da Zadeh si mantenga fede a tale postulato, bisogna tenere conto del fatto che l'antecedente dell'implicazione è in generale caratterizzato da un grado di verità compreso nell'intervallo  $[0,1]$ . Estendendo il principio del *modus ponens*, si ammette che *una regola, e quindi il suo conseguente, non può essere più vera di quanto lo sia l'antecedente*.

Supposto noto un vettore reale contenente le misure delle variabili *fuzzy*, si definisca l'*algoritmo fuzzy* in modo tale che per ciascuna *implicazione* il valore calcolato sia dato da:

$$y_i = g_i(x_1^0, x_2^0, \dots, x_k^0)$$

Il valore di *verità* di questo risultato può essere ottenuto mediante una generalizzazione del criterio del *Modus Ponens* e cioè:

- la conseguenza di una regola fuzzy è tanto vera quanto è vera la sua antecedente ovvero anche:
- la conseguenza di una regola fuzzy è non può essere più vera della sua antecedente

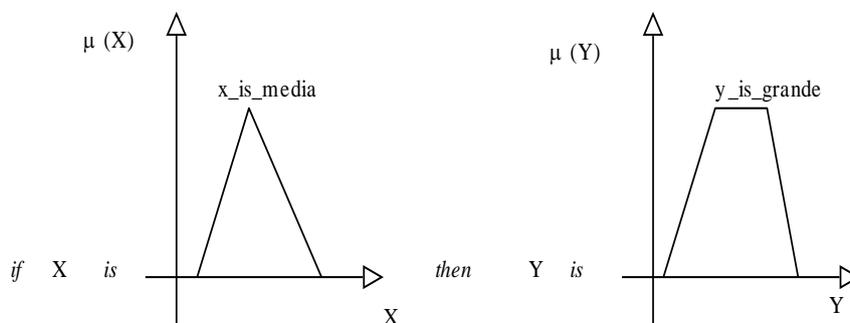


Figura 170: Rappresentazione grafica della regola fuzzy *if x is media then y is grande*

In questo caso ciascuna regola ha un *valore di verità* dato da:

$$|y = y_i| = \min(A_{1i}(x_1^0), A_{2i}(x_2^0), \dots, A_{ki}(x_k^0))$$

ove l'operatore  $|*|$  significa *valore di verità* della proposizione  $*$ . Il risultato finale è calcolato mediante la relazione (vedi maggiori dettagli nel prosieguo):

$$y = \frac{\sum |y = y_i| y_i}{\sum |y = y_i|}$$

ove la somma è estesa a tutte le regole che costituiscono l'*algoritmo fuzzy*. Si consideri a titolo d'esempio la Figura 170. In essa viene riportata la regola:

$$\text{if } x \text{ is } \textit{media} \text{ then } y \text{ is } \textit{grande}.$$

Nasce il problema di determinare l'uscita di tale regola quando si misura un certo valore della grandezza  $x$  che compare nell'antecedente. E' necessario, a tal fine, riportare sull'asse delle  $x$  il valore numerico assunto da tale variabile.

Il valore assunto dalla *funzione di appartenenza* in corrispondenza del punto che individua il valore di  $x$  rappresenterà il grado di appartenenza della grandezza misurata al *fuzzy set* indicato come *x is media*. Tale operazione assume il nome di *fuzzyficazione* di un valore numerico. Si è inoltre detto che l'uscita di un'implicazione *non può avere*, per il principio del *modus ponens*, un grado di verità maggiore rispetto al proprio antecedente. Ciò può essere ottenuto con vari metodi.

Generalmente si adottano i metodi del *troncamento* e del *prodotto*. Nel primo caso si tronca il valore della funzione di appartenenza dell'uscita al corrispondente valore calcolato per l'antecedente, nel secondo si moltiplica la funzione di appartenenza del conseguente per il grado di attivazione dell'antecedente. Quanto detto è riportato con un esempio in Figura 171. In tale figura viene riportato il *fuzzy set* associato all'implicazione precedente in corrispondenza di un valore numerico della grandezza  $x$ . Tale *fuzzy set* è rappresentato utilizzando delle spezzate a tratto spesso.

### Metodo del troncamento

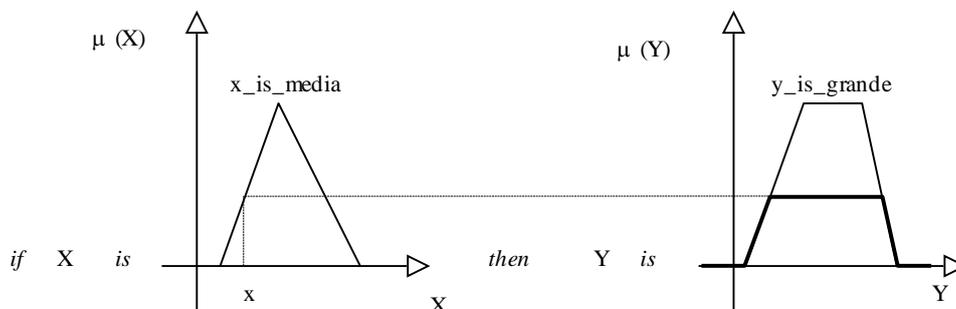


Figura 171: Esempi di calcolo del conseguente di una regola utilizzando il metodo del troncamento

Il metodo del prodotto è illustrato in Figura 172. Le definizioni introdotte possono essere estese al caso, molto comune nella pratica e in particolare nell'elaborazione dei segnali, in cui il segnale scelto per rappresentare l'uscita di un fenomeno dipenda da più variabili; si può pensare, infatti, che in tale caso il verificarsi del conseguente dipenda da tutte le condizioni espresse dall'antecedente e che quindi queste siano connesse tra loro da un'operazione di *and fuzzy*.

L'implicazione assume, nella sua forma più generale, la seguente struttura:

*if x is A and y is B ... and n is N then k is B*

dove  $A, B, \dots, N$  e  $C$  sono dei *fuzzy set*, definiti in opportuni universi del discorso.

### Metodo del prodotto

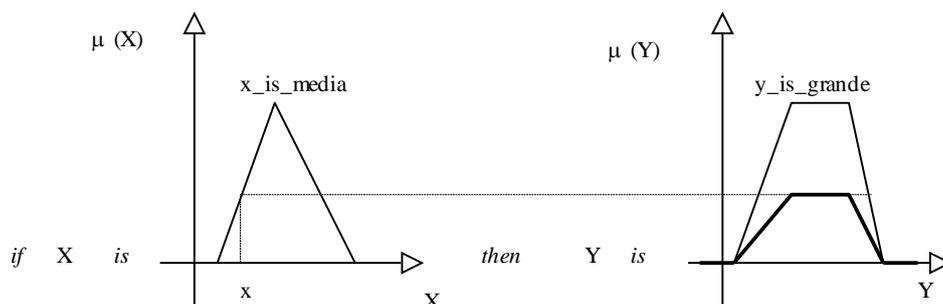


Figura 172: Esempi di calcolo del conseguente di una regola utilizzando il metodo del prodotto

Il termine:

*if x is A and y is B ... and n is N*

in analogia con quanto precedentemente definito, viene ancora detto *antecedente*, mentre il costruito:

*then k is B*

costituisce il *conseguente* dell'implicazione. Ricordando quanto detto a proposito del principio del *modus ponens* si deduce che se nell'antecedente della regola si hanno più condizioni, ognuna attiva parzialmente, l'intero antecedente, e quindi anche il conseguente, deve presentare un grado di attivazione uguale al *fuzzy and* di tutti gli antecedenti. Si consideri, ad esempio, la seguente regola:

*if x is media and y is grande then k is grande*

riportata graficamente in Figura 173:

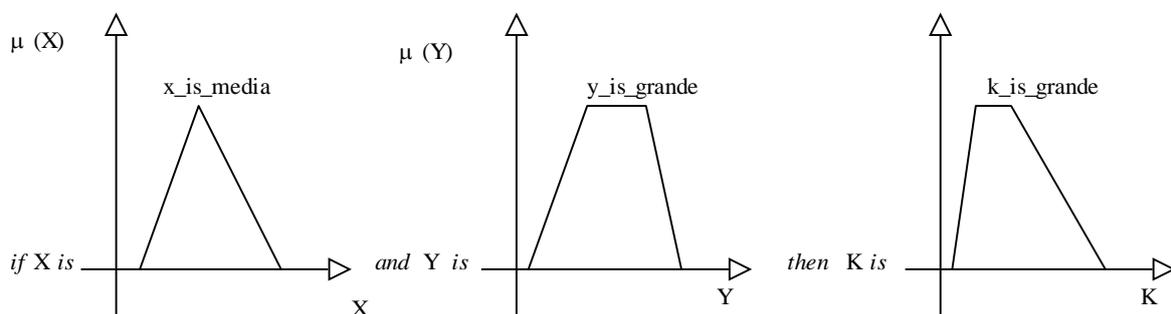


Figura 173: Rappresentazione grafica della regola: *if x is media and y is grande then k is grande*

In Figura 174 viene riportata l'uscita di tale regola, in corrispondenza di due valori numerici delle grandezze  $x$  ed  $y$  e supponendo di utilizzare il metodo del troncamento. Anche in questo caso il *fuzzy set* determinato viene rappresentato utilizzando una spezzata a tratto spesso.

Quando si descrive un fenomeno complesso in termini linguistici, spesso è necessario utilizzare più inferenze, ciascuna per descrivere un particolare aspetto dell'intero processo in esame.

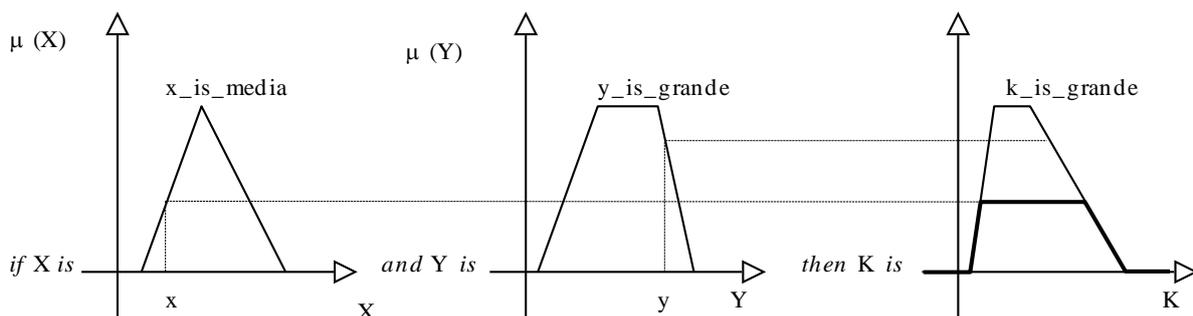


Figura 174: Esempio del calcolo dell'uscita di un'implicazione fuzzy contenente due fuzzy set nell'antecedente

Risulta, pertanto, evidente la necessità di combinare varie *implicazioni fuzzy* al fine di ottenere una struttura più flessibile (l'*algoritmo fuzzy*) in grado di rappresentare fenomeni complessi. Formalmente si può definire un *algoritmo fuzzy* come una collezione di regole espresse nella forma precedentemente indicata.

Si osservi che le varie regole forniscono, sotto forma di *fuzzy set*, e ciascuna indipendentemente dalle altre, un valore per l'uscita. Inoltre, ogni regola contribuisce a cumulare certezza sul valore assunto dalla variabile di uscita.

Quindi appare logico stabilire che l'uscita di un algoritmo *fuzzy* vada determinata calcolando l'or *fuzzy* delle uscite associate alle singole regole.

Si consideri, ad esempio il seguente algoritmo costituito da due regole:

**R1:** *if x is media and y is grande then k is grande*

**R2:** *if x is grande and y is grande then k is molto\_grande*

rappresentato in forma grafica in Figura 175.

Supponendo di aver misurato due valori per le grandezze  $X$  ed  $Y$  e di utilizzare il metodo d'*inferenza del troncamento*, si ottiene per l'uscita di tale algoritmo un *fuzzy set*, come riportato graficamente in Figura 175, dove l'uscita dell'intero algoritmo è rappresentata dalla spezzata a tratto spesso riportata in basso a destra.

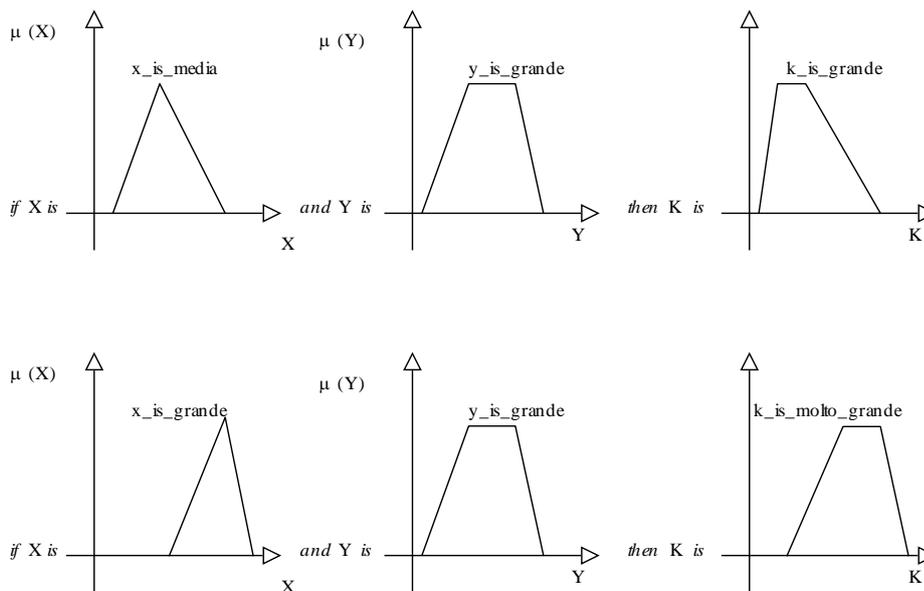


Figura 175: Esempio di algoritmo fuzzy, costituito da due regole

Da quanto finora espresso risulta evidente che l'uscita di un algoritmo fuzzy è costituita da un fuzzy set. Poiché nei problemi pratici, e in particolar modo nell'analisi dei segnali, si è interessati a descrivere una grandezza utilizzando un numero reale, è necessario introdurre un ulteriore operatore, che associo a un fuzzy set un numero reale adatto a rappresentare, secondo un qualche criterio, il contenuto informativo del fuzzy set stesso.

Tale operazione è detta di defuzzyficazione e costituisce il legame tra il mondo fuzzy dell'algoritmo e il modo dei numeri reali, con cui siamo abituati a descrivere il mondo che ci circonda. Per tale operazione sono state proposte in letteratura varie definizioni.

In particolare, in quanto segue verrà utilizzato il metodo di *defuzzyficazione* detto del *centroide*: il *fuzzy set* viene rappresentato, secondo tale metodo, dal baricentro della figura che rappresenta la funzione di appartenenza dell'insieme stesso. Si ha, quindi:

$$k_c = \frac{\sum u(i) \mu(u(i))}{\sum \mu(u(i))}$$

la sommatoria essendo estesa agli elementi del *fuzzy set* che hanno funzione di appartenenza non nulla.

Un altro metodo, detto *delle altezze* (usato quando si vuole *defuzzyficare* un insieme che proviene dall'unione di più *fuzzy set*), fornisce un valore che è la media pesata dei valori corrispondenti ai *centroidi* delle *funzioni di appartenenza* delle uscite associate alle varie regole. I pesi corrispondono al *grado di verità* degli antecedenti delle varie regole. Si ha, quindi:

$$k_c = \frac{\sum u(A_i) \mu(u(A_i))}{\sum \mu(u(A_i))}$$

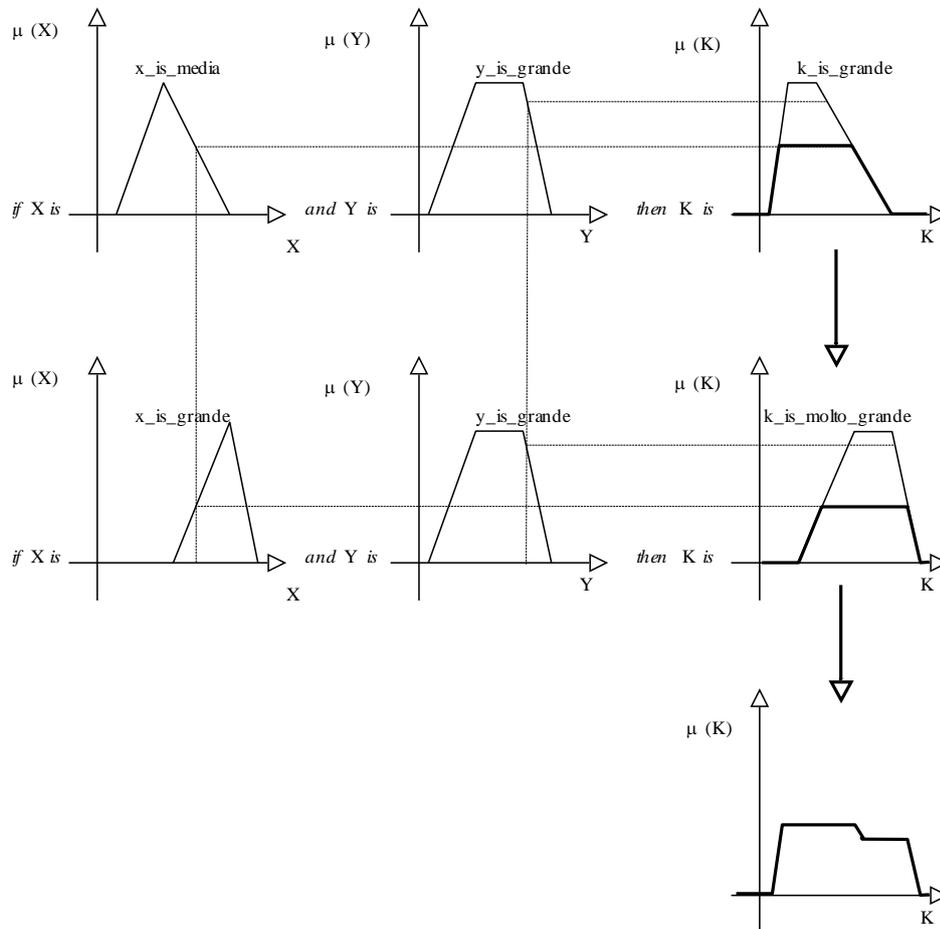


Figura 176: Determinazione dell'uscita di un algoritmo fuzzy con il metodo del troncamento

### 12.11.3. L'ALGORITMO FUZZY CON CONSEGUENTE LINEARE

Nelle applicazioni descritte in presente lavoro si è preferito ricorrere a una struttura delle implicazioni *fuzzy* leggermente diversa rispetto a quanto suggerito da Zadeh.

In particolare le regole *fuzzy* considerate assumono la seguente forma, secondo quanto proposto da *Sugeno* in un lavoro ritenuto fondamentale nel campo della logica *fuzzy*:

$$\begin{aligned} & \text{if } x_1^i \text{ is } A_1^i \text{ and } x_2^i \text{ is } A_2^i \text{ and } \dots \text{ and } x_n^i \text{ is } A_n^i \\ & \text{then } y^i = g^i(x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i) \end{aligned}$$

Il modello introdotto presenta una struttura che può essere considerata come un caso particolare del modello generale, introdotto da Zadeh e in particolare esso presenta le seguenti peculiarità:

le funzioni di appartenenza per i *fuzzy set* degli antecedenti sono tutte *funzioni lineari a tratti*, non crescenti o non decrescenti;

il conseguente è espresso da un numero reale; questo può essere considerato un particolare *fuzzy set* avente funzione di appartenenza unitaria in un solo punto dell'universo del discorso, ovvero un *singleton*.

Si assume, inoltre, che il conseguente sia ottenuto come funzione dei valori assunti da alcune, eventualmente tutte, delle variabili che entrano in gioco nell'antecedente. Nella struttura proposta in Sugeno (1985, [27]) si assume in particolare che la funzione  $g^i()$  sia lineare.

Pertanto la *i*-ma implicazione assume la forma riportata graficamente in Figura 177.

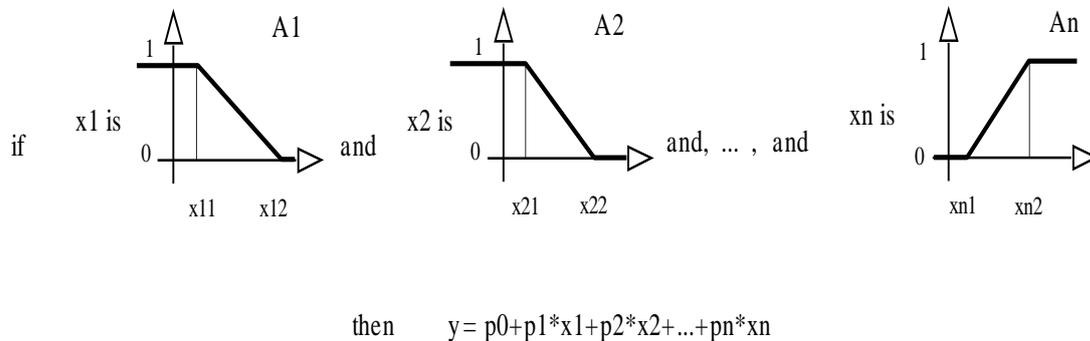


Figura 177: Esempio di implicazione proposta in Sugeno

Se l'algoritmo *fuzzy* contiene  $m$  regole, della forma precedentemente introdotta, applicando il metodo defuzzificazione del centroide si ricava che l'uscita  $y$  deve essere calcolata come media pesata, secondo il grado di attivazione delle singole regole, delle rispettive uscite  $y_i$ :

$$k_c = \frac{\sum_{i=1}^m \mu(y_i) y_i}{\sum_{i=1}^m \mu_i}$$

#### 12.11.4. DETERMINAZIONE DELL'ALGORITMO FUZZY

Il modello descritto precedentemente riveste un notevole interesse in quanto è stata proposta in Sugeno (1985) una procedura per la determinazione dei parametri che caratterizzano l'algoritmo *fuzzy*.

In particolare, il modello *fuzzy* introdotto nel paragrafo precedente dipende dal numero e dalla forma dei *fuzzy set* degli antecedenti, nonché dai parametri contenuti nei corrispondenti conseguenti.

Una esauriente descrizione della procedura necessaria alla determinazione dei parametri dell'algoritmo *fuzzy* è riportata in Sugeno, pertanto nel presente paragrafo verrà fornita solo una breve descrizione, ritenuta necessaria a una piena comprensione di quanto precedentemente esposto.

Nel seguito ogni algoritmo è individuato utilizzando una stringa del tipo  $M_{a,\dots,i,\dots,n}$ , essendo  $a,\dots,i,\dots,n$  dei numeri naturali associati alla struttura del modello (indicato con la lettera  $M$ ), in particolare ciascun numero indica quanti *fuzzy set* sono considerati per ogni variabile.

Il problema di ottimizzazione è di natura non lineare; è necessario pertanto ricorrere alle tecniche di programmazione non lineare.

#### Creazione del Modello Fuzzy

La metodologia seguita è quella suggerita dallo stesso S. Sugeno. Sia  $x$  e  $X$  un generico elemento dello spazio di sostegno: la funzione di appartenenza (*membership function*) di un *fuzzy set*  $A$  viene indicata con il simbolismo:  $A(X), x \in X$ .

Dovendo essere, per ipotesi a base dell'algoritmo, funzioni lineari si può pensare di caratterizzarle mediante due parametri: le ascisse dei punti angolosi delle funzioni di appartenenza, vedi Figura 178. Inoltre il *grado di verità* della proposizione :

$x$  is  $A$  and  $y$  is  $B$

é dato dalla relazione:

$$M(x \text{ is } A \text{ and } y \text{ is } B) = A(x) \wedge B(y)$$

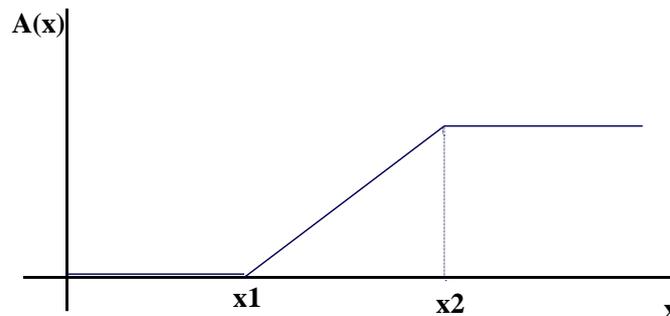


Figura 178: Caratterizzazione di una funzione di appartenenza di tipo lineare

La generica implicazione ha la forma:

if  $F(x_1 \text{ is } A_1, \dots, x_k \text{ is } A_k)$  then  $y = g(x_1, x_2, \dots, x_k)$

con  $y$  variabile di *inferimento* e  $g()$  funzione polinomiale di  $x_1, \dots, x_k$ . Pertanto la generica implicazione é della forma:

$R_1$ : if  $x_1$  is  $A_{11}$  and ..... and  $x_{ik}$  is  $A_{ik}$  then  $y_i = p_{i0} + p_{i1}x_{i1} + \dots + p_{ik}x_{ik}$

ove i termini  $x_{ik}$  sono *singleton* (cioè numeri reali).

Siano date  $n$  regole  $R_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) ed il vettore  $x_1^0, x_2^0, \dots, x_k^0$  di *singleton*. L'uscita di ogni regola *fuzzy* é calcolata utilizzando la funzione  $g_i()$  :

$$y_i = g_i(x_1^0, x_2^0, \dots, x_k^0) = p_{i0} + p_{i1}x_1^0 + \dots + p_{ik}x_k^0$$

mentre il *grado di verità* della proposizione  $y = y_i$  é dato da:

$$|y = y_i| = |x_1^0 \text{ is } A_{11} \text{ and } \dots x_k^0 \text{ is } A_{ik}| = [A_{11}(x_1^0) \wedge \dots \wedge A_{ik}(x_k^0)]$$

Il valore finale della  $y$  é dato dalla relazione:

$$y = \frac{\sum_i |y = y_i| * y_i}{\sum_i |y = y_i|} \quad [111]$$

### 12.11.5. ALGORITMO DI IDENTIFICAZIONE

Per *identificare* il modello *fuzzy* si debbono effettuare le seguenti fasi:

a) determinare le variabili  $x_1, x_2, \dots, x_k$  che compongono le *premesse* delle *implicazioni* e ciò equivale a scegliere la *classe* del modello;

b) fissare le funzioni delle *membership*  $A_1, A_2, \dots, A_k$  dei *fuzzy set* nelle *premesse*, indicati come *parametri delle premesse*;

c) determinare i parametri  $p_0, p_1, \dots, p_k$  nelle *conseguenze* il cui numero complessivo é pari a  $n(k+1)$  essendo  $n$  le regole e  $(k+1)$  i parametri per ogni regola.

### 12.11.6. IDENTIFICAZIONE DEI PARAMETRI DEI CONSEQUENTI

Si suppongono note le variabili  $x_1, x_2, \dots, x_k$  e i parametri delle *premesse*. L'*indice di performance* del modello é dato dalla relazione:

$$I.P. = \sqrt{\sum_{j=1}^m (y_j - \hat{y}_j)^2} \quad [112]$$

ove si é indicato con  $y_j$  il valore della misura reale e con  $\hat{y}_j$  il valore ottenuto dal modello.

L'uscita  $y$  per gli ingressi  $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_k^0)$  si calcola come già indicato nel paragrafo precedente con la (A.1) che in questo caso diviene, in modo esplicito:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n [A_{i1}(x_1^0) \wedge \dots \wedge A_{ik}(x_k^0)] * [p_{i0} + p_{i1}x_1 + \dots + p_{ik}x_k]}{\sum_{i=1}^n [A_{i1}(x_1^0) \wedge \dots \wedge A_{ik}(x_k^0)]} \quad [113]$$

con  $n$  numero delle regole *inferenziali* considerate. Indichiamo con  $\beta_i$  la seguente quantità:

$$\beta_i = \frac{[A_{i1}(x_1^0) \wedge \dots \wedge A_{ik}(x_k^0)]}{\sum_{i=1}^n [A_{i1}(x_1^0) \wedge \dots \wedge A_{ik}(x_k^0)]}$$

allora la [113] si può scrivere nella forma:

$$y = \sum_{i=1}^n \beta_i * (p_{i0} + p_{i1}x_1 + \dots + p_{ik}x_k) = \sum_{i=1}^n (p_{i0}\beta_i + p_{i1}x_1\beta_i + \dots + p_{ik}x_k\beta_i) \quad [114]$$

Noto un insieme di misure *ingresso-uscita* :

$(x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jk})$  con  $(j=1, 2, \dots, m)$

l'insieme dei parametri di uscita può essere calcolato con il metodo dei *minimi quadrati* (LSM). In pratica se definiamo le seguenti matrici:

$$X \in R^{m \times n(k+1)} \quad Y \in R^m \quad P \in R^{n(k+1)}$$

date da:

$$X = \begin{pmatrix} \beta_{11} & \beta_{n1}x_{11}\beta_{11} & \dots & x_{11}\beta_{11} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \beta_{1m} & \beta_{nm}x_{1m}\beta_{1m} & \dots & x_{1m}\beta_{nm} \end{pmatrix}$$

$$Y = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T$$

$$P = [p_{01}, p_{02}, \dots, p_{0n}, p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1n}, \dots, p_{k1}, p_{k2}, \dots, p_{kn}]^T$$

Il metodo dei *minimi quadrati* fornisce il valore ottimo del vettore  $P$  dato dalla relazione:

$$P = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad [115]$$

Pertanto la precedente relazione consente di determinare i valori di  $P$  per i quali risulta minimo lo scarto fra  $Y$  e  $\hat{Y} = XP$  con  $\hat{Y}$  vettore delle uscite stimate dal modello.

#### Identificazione dei parametri delle Premesse

Il problema consiste nel determinare i fuzzy set delle premesse avendo già scelte le variabili che le compongono. Si tratta, quindi, di determinare i parametri delle membership function in modo da minimizzare l'indice di performance dato dalla [112]. Questa procedura é detta *identificazione dei parametri delle premesse* (*premise parameter identification*) e si attua secondo le seguenti fasi.

- Si fissano i parametri dei *fuzzy set* delle *premesse* e si determinano, come visto nel paragrafo precedente con le [114] e [115], i parametri *ottimi* dei conseguenti.
- Si modificano, quindi, i parametri inizialmente posti e si ricalcolano i parametri dei conseguenti. Il processo diviene iterativo ed ha fine quando l'indice di *performance* [112] del modello é considerato buono. Il problema della ricerca dei parametri ottimi delle *premesse* é tipico della *programmazione non lineare* poiché le *funzioni di appartenenza* sono *lineari a tratti*. Viene solitamente utilizzato il metodo del *simplesso* che spesso costituisce una routine di libreria disponibile in diversi linguaggi o addirittura fa parte delle funzioni messe a disposizione dai programmi di CAD matematico, quali *MatLab*<sup>®</sup> o *Mathematica*<sup>®</sup>. Per il calcolo delle *funzioni di appartenenza* occorre individuare i punti  $x_1$  e  $x_2$  rappresentati in Figura 178.

### Scelta delle Variabili delle Premesse

Non tutte le variabili presenti nel *conseguente* sono presenti nella *premissa* e quindi occorre scegliere tali variabili e il numero di *fuzzy set* da introdurre per ciascuna variabile scelta.

Il problema é di tipo combinatorio e pertanto non é possibile fornire una soluzione generale. Si può seguire il metodo *euristico* qui di seguito proposto.

Si suppone che il modello *fuzzy* sia costituito da  $k$  ingressi  $x_1, x_2, \dots, x_k$  ed una sola variabile di uscita  $y$ . La scelta delle premesse avviene attraverso le seguenti fasi:

Si suddivide  $x_1$  in due intervalli, ad esempio *big* e *small*, mentre si lasciano inalterate le altre variabili (cioè la loro *membership function* é posta pari al valore 1) e pertanto esse non compaiono nell'*antecedente*. Il modello assume la forma:

*if  $x_1$  is  $big_1$  then .....*

*if  $x_1$  is  $small_1$  then .....*

ed é detto modello 1-1. Analogamente un modello nel quale solo  $x_2$  é suddivisa in due intervalli é detto 1-2. In generale si hanno tanti modelli 1- $i$  della forma:

*if  $x_i$  is  $big_i$  then .....*

*if  $x_i$  is  $small_i$  then .....*

a) Per ciascun modello si calcolano i parametri ottimi delle *premesse* e delle *conseguenze* ed il corrispondente *indice di performance* (2). Il modello avente indice minimo viene detto *modello stabile*.

b) Partendo dallo *stato stabile 1-i* sopra determinato si considerano tutte le combinazioni  $x_i-x_j$  con ( $j=1,2,\dots,k$ ) e si divide l'intervallo di ciascuna variabile in due sottosistemi *fuzzy*. Si ottengono, così,  $k$  modelli del tipo 2- $j$  ciascuno dei quali contiene due *implicazioni* e si ricava il nuovo *modello stabile* come descritto nel punto b).

c) Si ripete la procedura fino a trovare un valore soddisfacente dell'*indice di performance* [112].

Di solito si utilizza il simbolismo  $M_{x_1x_2x_3\dots x_k}$  per indicare il tipo di modello in elaborazione.

Ad esempio il simbolo  $M_{2000}$  indica una suddivisione in due intervalli solo per la prima variabile,  $M_{2220}$  indica una suddivisione in due intervalli per le prime tre variabili, e così via.

In pratica la scelta delle variabili delle *premesse* procede secondo lo schema indicato in Figura 179.

Nel caso del modello acustico si possono scegliere, ad esempio, le seguenti variabili:

$x_1$	larghezza della strada;
$x_2$	numero di autovetture;
$x_3$	numero di mezzi pesanti;

$x_4$	numero dei motocicli
$x_5$	larghezza strada a sinistra
$x_6$	larghezza strada a destra
$y$	livello equivalente, $L_{eq}$ .

Il modello *fuzzy* sopra descritto dipende dagli insiemi *fuzzy* contenuti nelle premesse di ciascuna regola e dai polinomi delle conseguenze associate.

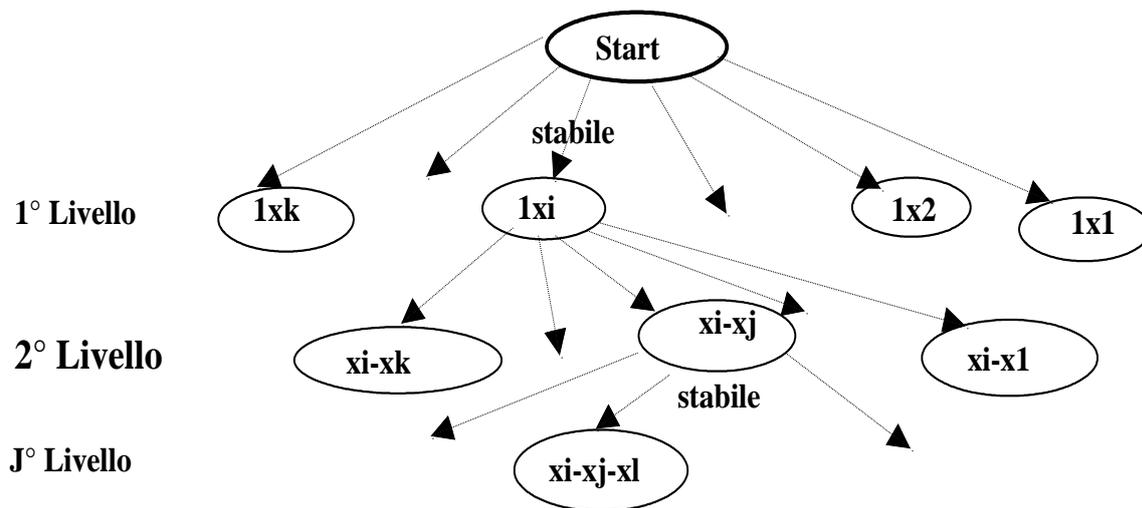


Figura 179: Organizzazione della scelta delle variabili delle premesse

### Algoritmo di Sugeno per la valutazione del rumore

Mediante algoritmi di ottimizzazione sono state individuati due insiemi *fuzzy* identificati come *small* e *large* rispettivamente per il numero medio di veicoli e per l'altezza media degli edifici, mentre non si sono individuate classi per la larghezza stradale, Figura 180. Tuttavia quest'ultima variabile è presa in considerazione nella conseguenza di ciascuna regola *fuzzy*.

Gli insiemi *fuzzy* individuati e le regole *fuzzy* considerate sono riportate nella seguente figura 59 ove sono riportati i valori dei parametri che identificano i *fuzzy set* delle premesse e dei coefficienti dei polinomiali conseguenti.

Nella Figura 181 è riportato un confronto fra i risultati ottenuti mediante il modello *fuzzy* e quello statistico rispetto ai valori sperimentali. Appare evidente come il modello *fuzzy* sia molto vicino ai dati sperimentali e riesca a seguirne con straordinaria precisione anche l'andamento.

### Confronto fra il modello neurale e il modello fuzzy

Il modello *fuzzy* è essenzialmente legato all'interpolazione dei dati e pertanto sbaglia facilmente al di fuori dell'intervallo di identificazione utilizzato. Per contro il modello neurale è in grado di operare, nelle immediate vicinanze degli estremi dell'intervallo di misura, una qualche estrapolazione.

Inoltre il modello *fuzzy* è strettamente legato agli scenari di inquinamento acustico presi in considerazione nella fase progettuale di identificazione, Figura 182.

Variare le ipotesi del modello (ad esempio prendendo in considerazione altri parametri prima non considerati, comporta la necessità di ricostruire il modello fuzzy identificando i nuovi fuzzy set e le nuove regole inferenziali.

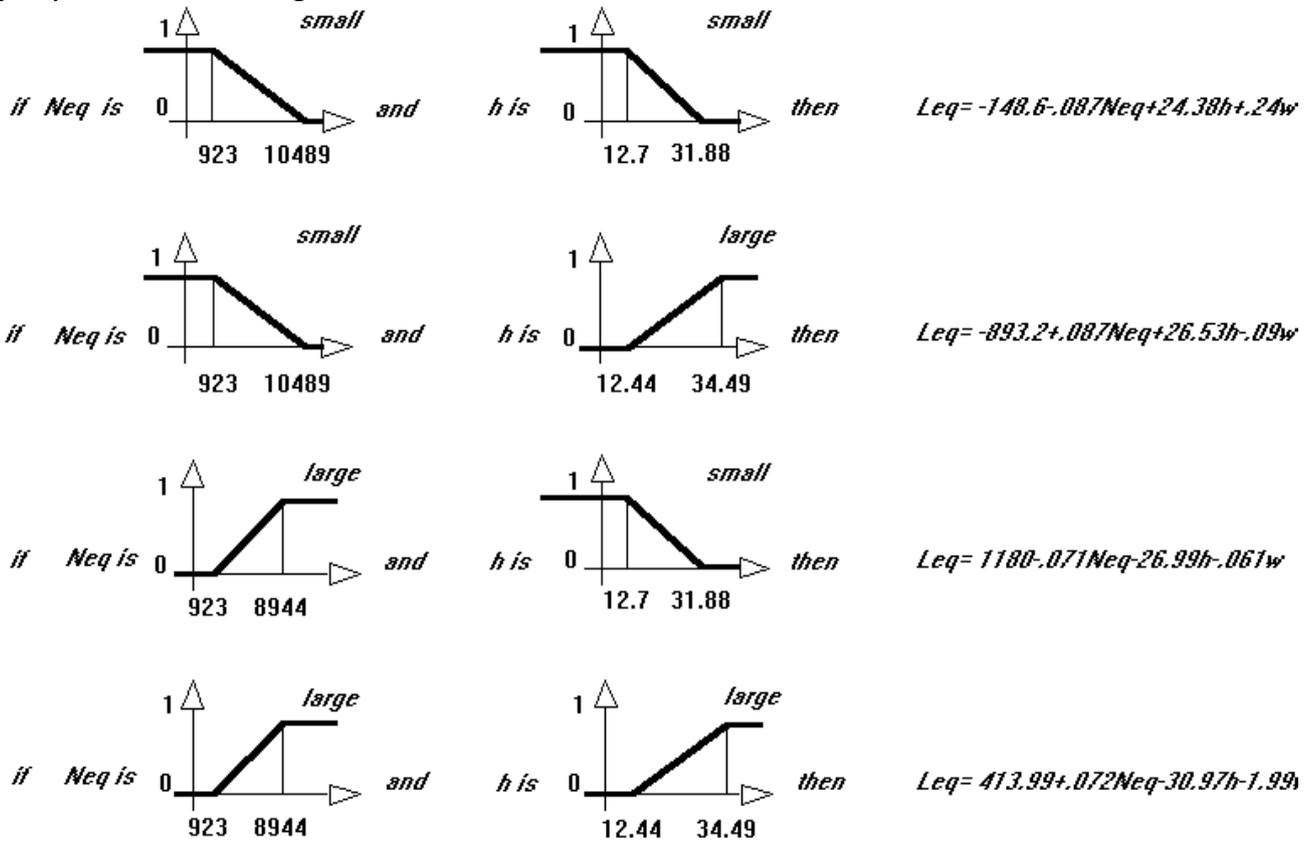


Figura 180– Regole fuzzy per il modello di rumorosità urbana di Catania

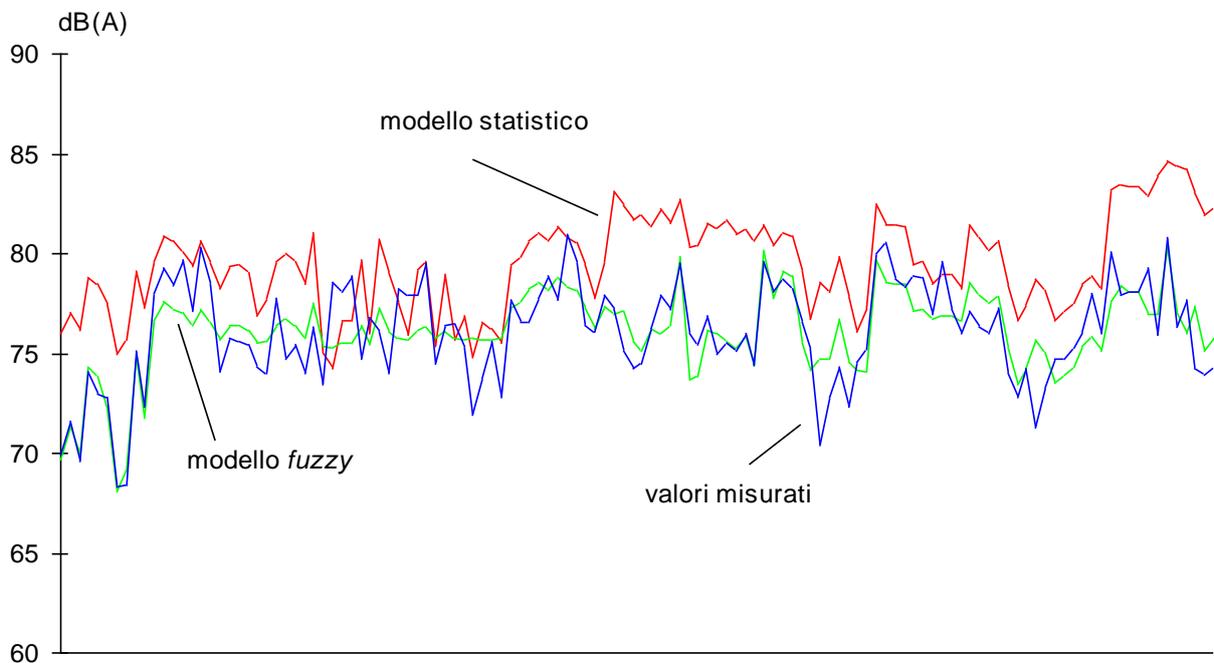


Figura 181- Confronto fra modelli fuzzy, statistico e valori misurati per Catania

Ciò costituisce certamente un vincolo pesante in fase di studio e di analisi dei modelli di rumore per la notevole mole di calcoli da effettuare per la definizione di ciascun modello.

Considerando i parametri urbanistici diversi da quelli sopra considerati (larghezza della strada, altezza media degli edifici) si può concludere che il modello neurale mostra una più marcata capacità di adattamento e di risoluzione del problema.

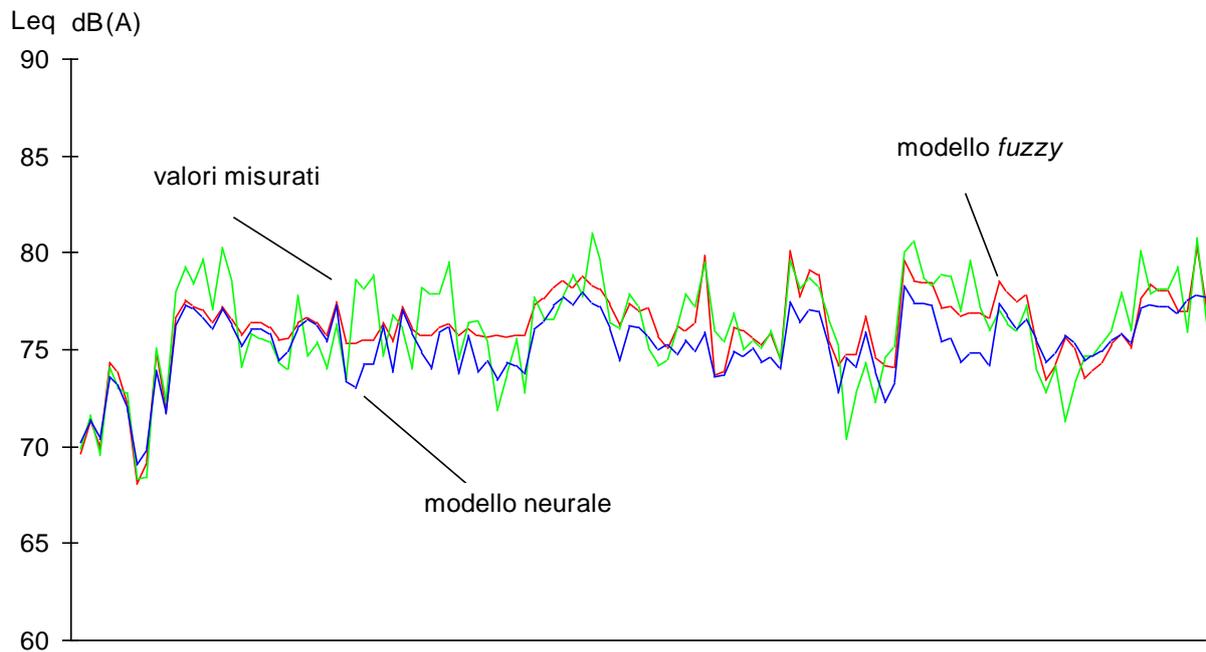


Figura 182– Confronto fra i modelli neurale e fuzzy

E' proprio la maggiore flessibilità del modello neurale che lo ha privilegiato nelle applicazioni effettuate recentemente anche nell'ambito delle ricerche effettuate per il POP Sicilia 90/93 e negli studi di risanamento ambientale in applicazione della L. 447/95.

## 13. ACUSTICA DELLE SALE

Ci sono stati tramandati dai greci e dai romani numerosi teatri all'aperto ma nessun teatro chiuso. In effetti l'Acustica delle sale chiuse è sempre stata complicata e non si aveva alcuno strumento per poterla gestire e padroneggiare anche a livello progettuale. Già dal 1600 numerose sale teatrali in Europa furono costruite e poi demolite per ricercare una forma funzionale. Solo all'inizio del 1900 per opera dell'Arch. C.W. Sabine si è avuta la prima relazione fisica sul tempo di riverberazione. Da allora molto è stato fatto su quest'argomento ed oggi siamo perfettamente in grado di progettare sale teatrali con acustica soddisfacente.

### 13.1. L'ACUSTICA DELLE SALE

L'acustica delle sale teatrali è conquista culturale relativamente recente nel panorama della tecnica delle costruzioni da spettacolo. Fin dall'antica Grecia i luoghi di spettacoli erano prevalentemente all'aperto (vedi teatro di *Cnosso*) e quindi non eccessivamente influenzati dai problemi delle riflessioni acustiche delle pareti, come normalmente avviene nei teatri chiusi.

A *Cnosso* la progettazione ha tenuto conto solamente dei problemi visivi introducendo le gradinate, ancora oggi usate in tutti i teatri.

Le teorie di *Aristosseno* sulla propagazione circolare delle onde sonore, riportate anche da *Vitruvio*, sono state alla base della costruzione dei teatri greci all'aperto del tipo a ventaglio (vedi

l'esempio mirabile del teatro di *Epidauro* illustrato nella figura seguente) e poi dei teatri romani a forma ellittica.

Secondo questa teoria le onde sonore si propagano "*come le onde in uno stagno ma si spostano anche in altezza e non solamente sul piano*". L'algoritmo di propagazione delle onde acustiche è rappresentato in figura seguente ed è anche riportata la costruzione di *Vitruvio* per i teatri all'aperto. Si può osservare come le onde dirette vengano intercettate dagli occupanti delle gradinate e non siano presenti onde riflesse.



Figura 183: Teatro di Cnosso (Creta)

I criteri costruttivi dei teatri all'aperto sopra indicati possono essere validamente utilizzati anche oggi purché si tenga presente l'orientamento dei teatri: nell'antichità le rappresentazioni si svolgevano di giorno mentre oggi si preferiscono le rappresentazioni notturne e pertanto il vento viene dal mare.

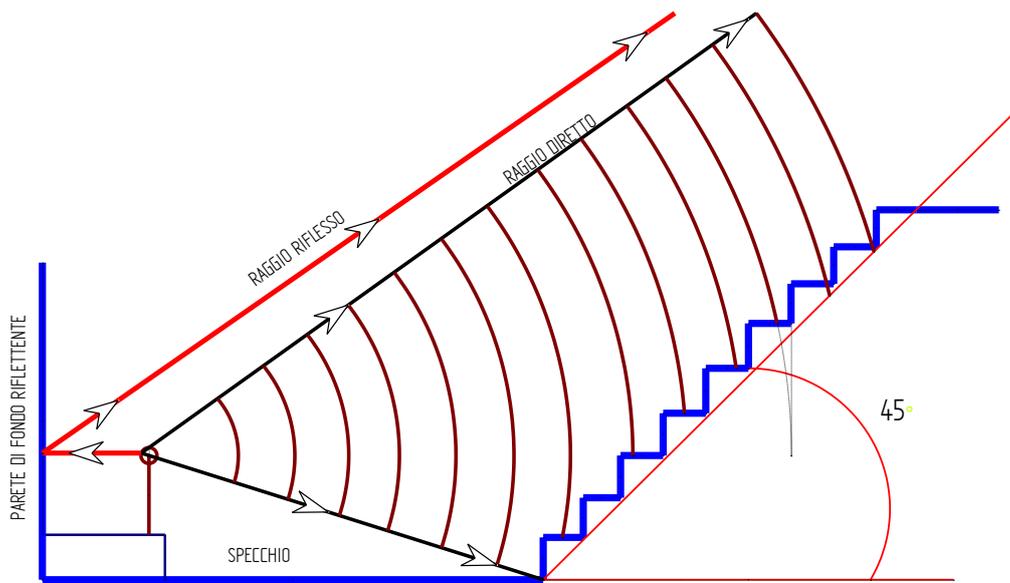
Diversa situazione si ha nelle sale teatrali chiuse: in questo caso le onde acustiche interagiscono con le strutture dell'edificio determinando un campo sonoro misto la cui influenza sull'acustica delle stesse sale risulta di difficile previsione, vedi le riflessioni multiple per la sala *IRCAM* di Parigi nel prosieguo.

A parte gli studi iniziali di *Sabine* a fine secolo scorso solo dal 1960 si sono sviluppate nuove teorie sia nell'ambito dell'acustica delle sale che nell'ambito della psico-acustica che alla prima è strettamente correlata.

L'ascolto dell'uomo, infatti, non è un fatto oggettivo e quindi deterministico bensì fortemente soggettivo e legato anche a situazioni psico-fisiche momentanee che portano il soggetto a variare il giudizio in funzione dello stato d'animo, dell'attenzione, delle circostanze, dei luoghi (sensazioni di spazialità, colore, calore, ...).

Conoscere questi giudizi soggettivi risulta determinante al fine del raggiungimento delle desiderate prestazioni acustiche e nella valutazione delle sale musicali e pertanto debbono essere tenuti in considerazione con parametri acustici di nuova definizione e che vanno oltre la definizione del classico (anche se utilissimo) ma limitato tempo di riverberazione proposto da Sabine

In pratica l'architettura della sale teatrali si é evoluta negli ultimi secoli in base a considerazioni pratico-sperimentali dettate più da un apparente sesto senso dei progettisti che da vere considerazioni scientifiche.



PROPAGAZIONE DELLE ONDE SFERICHE NEI TEATRI GRECI

Figura 184: Propagazione delle onde acustiche in un teatro all'aperto

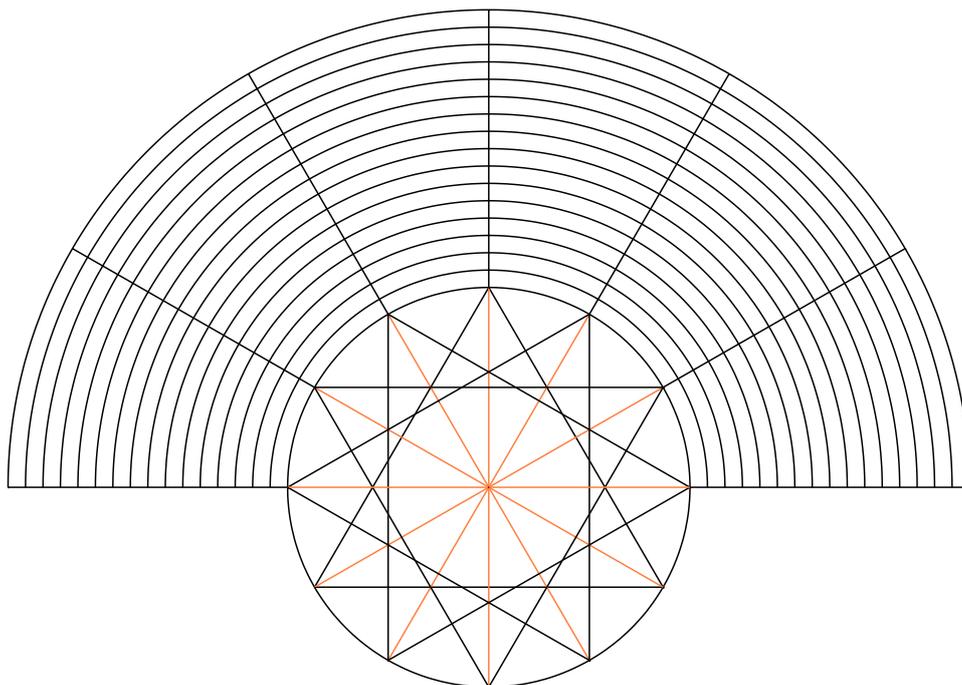


Figura 185: Costruzione di Vitruvio per i teatri all'aperto

Spesso alla base delle passate progettazioni vi era la presunzione di validità del criterio guida delle linee-visive: se la sala consente una buona visione della scena allora essa consente anche una buona acustica.

Ciò, in effetti, alla luce dell'acustica geometrica, rende conto solo di alcuni aspetti dell'*Acustica delle Sale* e dimostra come ancora una volta un'intuizione fortuita sia produttrice di grandi opere. Vale la pena di osservare che ancora oggi i progettisti si affidano spesso a questo criterio considerando l'acustica della sala solo un effetto indotto, cioè un beneficio che viene da solo dalla normale progettazione architettonica. E spesso ci si meraviglia se tali risultati non sempre si ottengono!

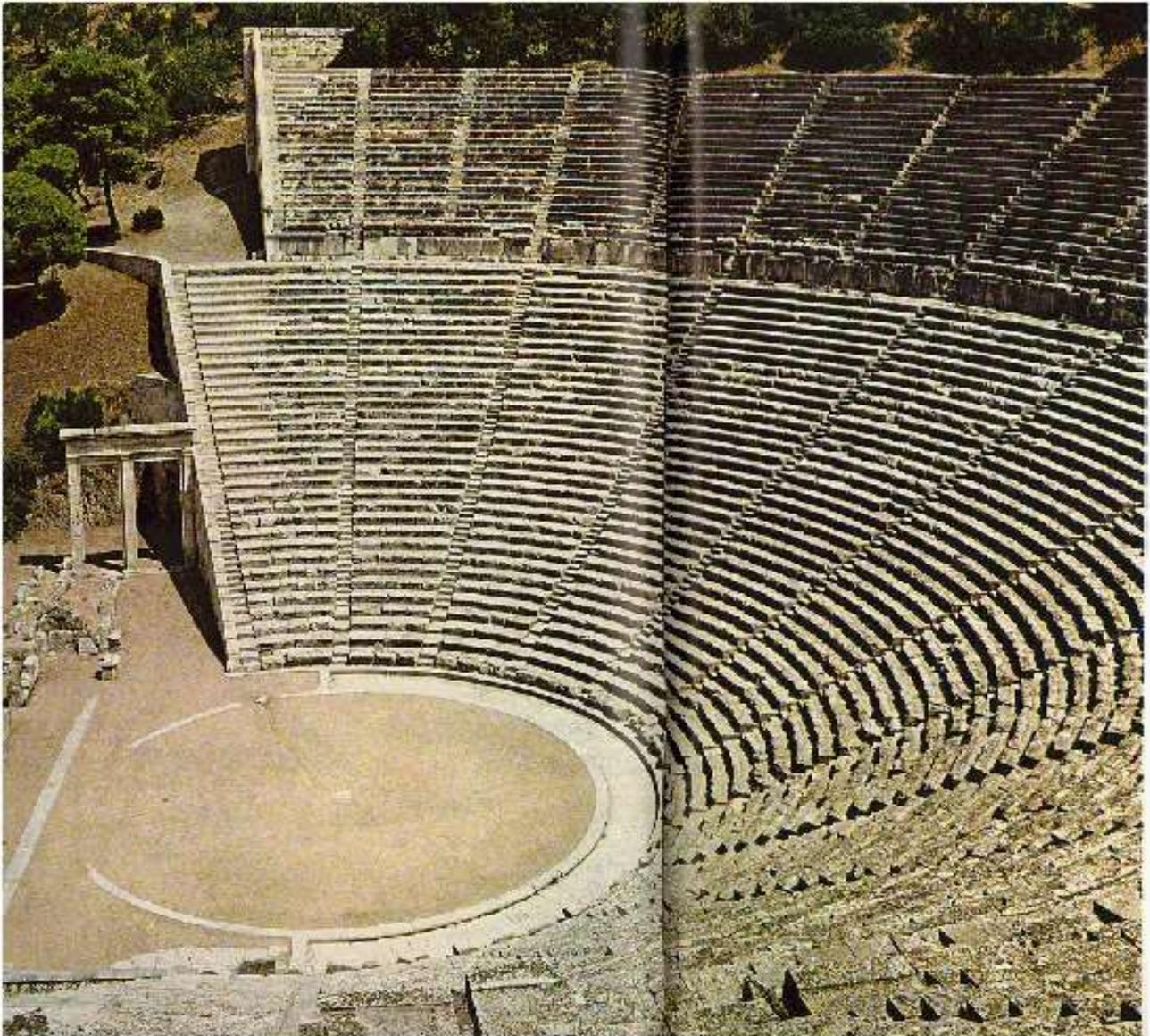


Figura 186: Teatro di Epidauro (Grecia)

Questa mancanza della cultura acustica è in gran parte dovuta, a mio giudizio, anche alla carente preparazione di base dei corsi di laurea in Ingegneria e in Architettura che spesso ignorano o relegano in secondo ordine i corsi di *Acustica* e *Acustica Architettonica*. Non a caso le sale teatrali (ma anche i teatri all'aperto) hanno forme architettoniche **molto simili**. Il progetto di una nuova sala teatrale ha sempre presentato rischi nascosti che nessun progettista è stato disposto a

correre, almeno fino al secolo scorso, e pertanto il progetto dei vari teatri é stato quasi un plagio di teatri esistenti, noti per la buona acustica.

A partire dal secolo scorso, anche in considerazione dello sviluppo e del diffondersi della musica da camera e della musica sinfonica, si sono costruite numerose sale da concerto con la sperimentazione di nuove geometrie e nuove soluzioni architettoniche.

Molte delle sale così costruite hanno avuto vita breve in considerazione anche dei modesti risultati ottenuti. Alcune, le migliori, sopravvivono ancora oggi e costituiscono un punto di riferimento per lo studio sistematico e scientifico dell'*Acustica delle Sale*.



Figura 187: Teatro greco di Siracusa<sup>19</sup>

Solo in tempi relativamente recenti (sono di Sabine di fine secolo scorso ed inizio secolo le prime riflessioni e i primi studi sull'acustica teatrale) si sono avuti i primi criteri progettuali e le prime relazioni analitiche in grado di mettere il progettista nelle condizioni di prevedere un qualche risultato acustico che poi è stato sempre necessario verificare sul campo con incerti risultati.

Con Sabine si é passati dalla progettazione qualitativa dell'ottocento all'inizio della progettazione quantitativa utilizzando il parametro che egli stesso ha suggerito: il *tempo di riverberazione* della sala.

---

<sup>19</sup> Il Teatro greco di *Siracusa* è scavato nella roccia, come quasi tutti i teatri greci dell'antichità.

Negli ultimi due decenni si sono sviluppati metodologie di calcolo e di progettazione (programmi di CAD acustico) in grado di fornire ai progettisti tutte le informazioni necessarie alla corretta progettazione e simulazione delle sale acustiche.

Recenti sale teatrali (vedi ad esempio l'*Opera della Bastiglia* a Parigi o, più di recente, il *Lingotto* a Torino o il nuovo teatro dell'Opera di Roma) sono state interamente progettate con CAD acustici e verificate sia con modelli in scala.

I risultati ottenuti sono stati eccellenti, tanto da far fiorire uno sviluppo informatico dedicato all'acustica architettonica.

Lo sviluppo degli studi sull'*Acustica delle Sale* ha portato alla formulazione di nuovi indici (detti indici *oggettivi* in quanto legato ai contenuti energetici della sala) di valutazione delle prestazioni acustiche delle sale ai quali si sono affiancati metodi sofisticati e sempre più perfezionati di valutazione soggettiva dell'ascolto nelle sale musicali.



Figura 188: Teatro greco di Segesta<sup>20</sup>

Già da qualche decennio il tempo di riverberazione é apparso limitativo quale unico descrittore dell'acustica di una sala, pur essendo ancora un parametro ancora valido per qualificare l'acustica complessiva delle sale. La verifica di questo parametro è oggi considerata necessaria (in quanto parametro globale della sala) ma non sufficiente in quanto non correlato alle situazioni locali e variabili della stessa sala. Il tempo di riverberazione, infatti, non tiene conto delle peculiarità interne alla sala quali, ad esempio, le pareti nelle vicinanze degli ascoltatori o effetti di

---

<sup>20</sup> Il Teatro greco di *Segesta* è solo parzialmente scavato nella roccia. E' un caso raro di costruzione di teatri con riporto di materiale.

concentrazione di onde acustiche, come può avvenire in sale con punti focali determinati (sale circolari o sale ellissoidali).

Né i parametri *qualitativi* suggeriti da L. Beranek (vedi nel prosieguo) possono in qualche modo migliorare la situazione da un punto di vista progettuale: pochi sono, infatti, quelli calcolabili a priori su base progettuale mentre molti sono i parametri calcolabili (o verificabili) a posteriori in sale già costruite. L'ultima sala teatrale costruita a New York con il criterio di L. Beranek è stata un grande insuccesso avendosi differenze di ascolto persino fra poltrone adiacenti.

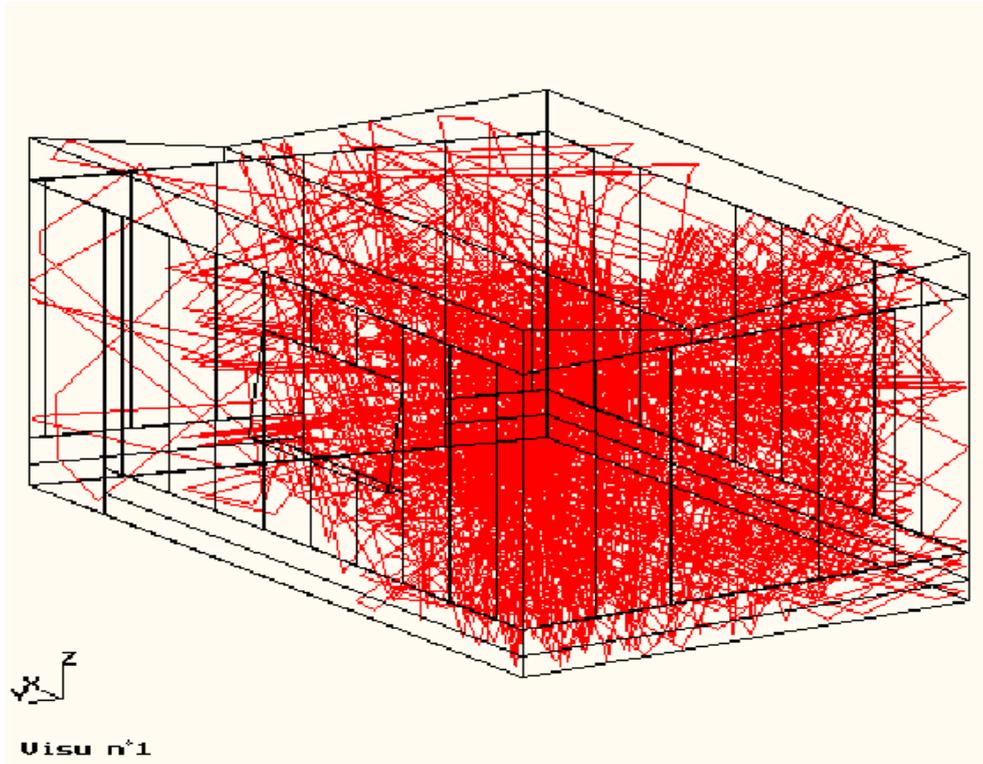


Figura 189: Riflessioni multiple nella sala IRCAM di Parigi

## 13.2. UN PO' DI STORIA DELLE SALE TEATRALI

La storia delle sale teatrali europee è lunga e contrassegnata da grandi insuccessi. **Michael Forsyth** ci indica numerose costruzioni di varia geometria ormai quasi tutte scomparse.

In effetti le sale teatrali comparse a partire dal XVII secolo erano quasi sempre luoghi di ostentazione di ricchezza, di esaltazione degli *status symbol* della classe nobiliare.

Ne è un esempio la *Rotunda* a Ranelagh Garden che ci viene riportata in un dipinto del Canaletto (vedi figura in seguito). La sala è composta da una serie di palchi laterali finemente arredati, ha una grossa stufa al centro per riscaldare la sala ed un palchetto per l'orchestra che suonava musica di intrattenimento mentre i nobili passeggiavano e conversavano nel *parterre* privo di poltrone e dove, spesso, si entrava con le carrozze. Il teatro era un luogo di intrattenimento mondano, una sorta di circolo nobiliare dove mostrare gioielli, *parures* e ricchezza. Nulla fa intravedere uno studio sul comportamento acustico ottimale della sala che doveva molto verosimilmente essere rimbombante.

In fondo qualcosa di questa antica impostazione è rimasta per i moderni teatri. Ancora oggi assistiamo, infatti, alle *prime teatrali* che sono dei veri e propri *eventi* mondani ove ancora prevale l'ostentazione di ricchezza e/o di potenza e importanza sociale più che un vero interesse teatrale. Basta osservare la Prima della Scala di Milano per averne una prova!

D'altra parte il teatro come oggi lo immaginiamo, cioè luogo di rappresentazione musicale o di spettacoli in genere, non esisteva fino alla seconda metà del 'settecento. Fu Mozart che fece installare per primo le poltrone nella sala e solo a partire dall'*ottocento* si cominciò a pensare di avere nei teatri rappresentazioni musicali (operistiche in Italia e sinfoniche nel resto d'Europa).

Volendo costruire sale dedicate agli spettacoli si pose sempre più fortemente il problema dell'*Acustica delle Sale* poiché erano evidenti a tutti gli effetti della *riverberazione* acustica, degli echi e, conseguentemente, della mancanza di *intelligibilità* del parlato.



Figura 190: Dipinto del Canaletto della Rotonda di Ranelagh Garden

In effetti la complessità dell'acustica delle sale teatrali era ben lungi dall'essere risolta nel 1800 ed anche fino agli inizi degli anni '70. In quegli anni, va citato, si costruirono e si demolirono sale teatrali costruite con i vecchi metodi (basati sul criterio di L. Beranek) a New York e a Londra.

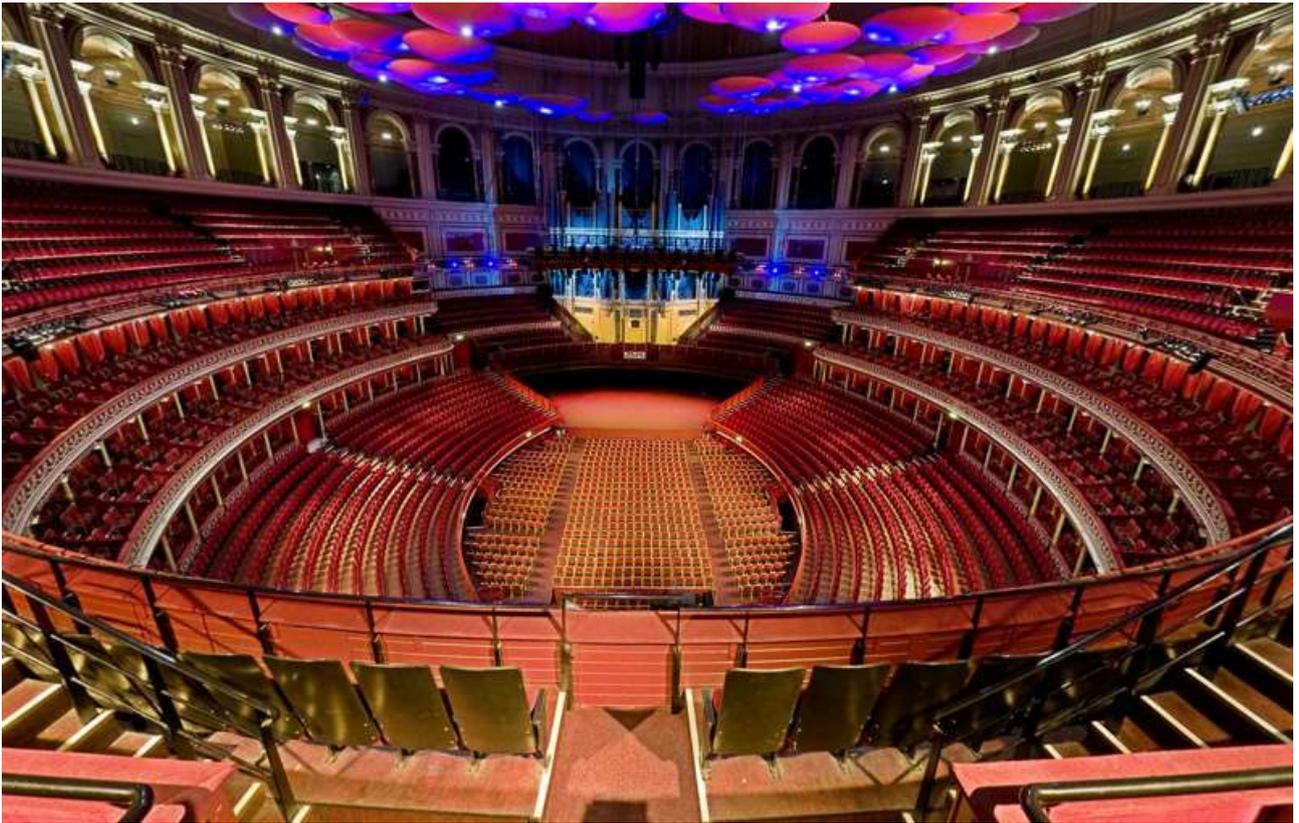
Non erano ancora chiari i fenomeni interni alle sale, mancavano le relazioni fisiche per gestirli e non si conoscevano ancora gli effetti psicofisici delle pareti laterali. Le poche sale teatrali tramandate dall'*ottocento* erano di forma detta a *parallelepipedo* (Teatro di Vienna, di Londra) o del tipo a *campana* (scuola dei Galli Bibiena).



*Figura 191: Teatro Scientifico di Mantova, Galli Bibiena 1761*



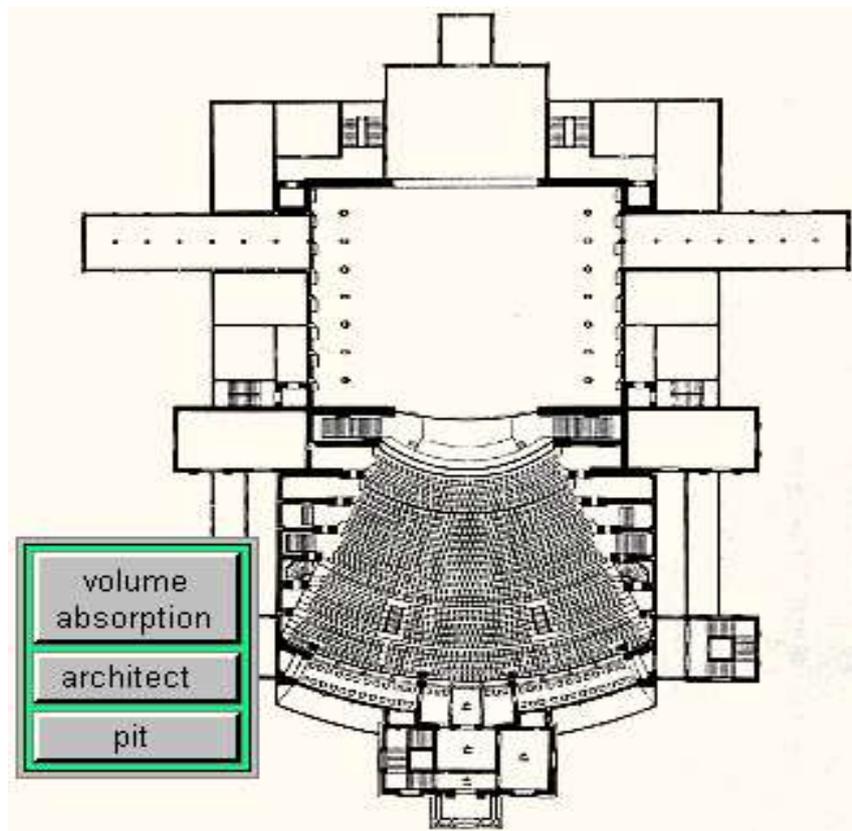
*Figura 192: Concert Hall di Boston*



*Figura 193: Royal Albert Hall di Londra (1851)*



*Figura 194: Musikverein di Vienna*



*Figura 195: Teatro Bayreuth di Monaco*



*Figura 196: Teatro San Carlo di Napoli*

Rispetto alle sale teatrali dell'*ottocento* le nuove sale teatrali, vedi foto nel prosieguo, rappresentano un notevole passo in avanti sia per la complessità architettonica che per il contenuto tecnico – scientifico che presentano.

Se si fa riferimento alle sale sinfoniche (vedi *Roy Thompson Hall* o il *Muziekcentrum Vredenburg*) si possono osservare le numerose superfici interne che cercano di riempire la sala in ogni dove.

Si osservino le pareti laterali (*per le riflessioni immediate*) e gli schermi acustici del soffitto ben mascherati nell'architettura della sala (arredi, lampadari, ...). Le pareti laterali generano riflessioni dette immediate (cioè entro il 10-15 ms dall'onda diretta e quindi fino ad una distanza di 6-8 m dall'ascoltatore) che sono percepite dal nostro cervello come un rafforzamento della scena (orizzontale e/o verticale a seconda della provenienza) e quindi creando i presupposti per un ascolto ottimale.



*Figura 197: Roy Thompson Hall di Toronto*

Nelle zone centrali delle sale teatrali, lontane dalle pareti laterali, gli effetti psicofisici di allargamento della scena mancano e la percezione sonora è qualitativamente inferiore rispetto alle zone laterali.

Tutto questo spiega la presenza numerosa di pareti laterali, di palchetti, di piccole gallerie, ...

Si vuole fare in modo da far percepire riflessioni immediate alla maggior parte degli spettatori.

Molti immaginano che la postazione migliore sia quella al centro della sala ma in effetti non è così sia per la *lontananza* delle pareti laterali che per gli effetti (negativi) di elevata *simmetria*.

Il nostro cervello determina la posizione della sorgente acustica dalla differenza di percorso (e quindi di tempi di arrivo) del suono all'orecchio destro e all'orecchio sinistro. In punti con asse

di simmetria centrale questa determinazione risulta difficoltosa e il nostro cervello ricorre ad altre informazioni quali le vibrazioni delle ossa cartilaginee della testa. Meglio avere una dissimmetria per un migliore ascolto.

Lo stesso problema si ha con il palco reale o presidenziale posto in asse con il palcoscenico, in condizioni di perfetta simmetria. L'ascolto non è buono e basta spostarsi nei palchi contigui per avere un netto miglioramento dell'ascolto.

Fino agli inizi degli anni 'settanta il criterio di buona progettazione architettonica delle sale era sintetizzato nel detto "*se vedo bene allora sento bene*". Pertanto molti teatri (Petruzzelli di Bari, Regio di Torino ed altri) vennero costruiti con questo schema progettuale (vedi figura seguente). Anche il profilo verticale della sala era (ed è ancora) disegnato in modo da consentire la vista della scena teatrale evitando il disturbo della testa dello spettatore seduto davanti.

Questo concetto, presente già nel teatro all'aperto di *Cnosso*, è certamente valido per la corretta visione della scena ma non ha nulla a che vedere con la buona acustica delle sale teatrali.

### 13.3. IL PROFILO OTTIMALE DELLA SALA TEATRALE

Le particolari caratteristiche della voce umana hanno sempre stimolato la fantasia dei progettisti per la determinazione di una forma ottimale dei teatri.

Già G. *Saunders* (1790) propose, in base ai suoi studi, una forma circolare che M. *Barron* (1991) ha ritrovato interessante come punto di partenza per una moderna teoria della progettazione teatrale. La forma circolare per spazi aperti sembra anche oggi adeguata per una buona trasmissione della voce in avanti rispetto al parlatore. In pratica si può pensare ad un settore circolare di circa 220° che posteriormente si appiattisce.



Figura 198: Muziekcentrum Vredenburg di Utrecht

In figura è riportato lo schema progettuale suggerito per spazi aperti. La forma circolare concorda con le curve di eguale pressione sonora e che sono anche di eguale intelligibilità del parlato. La distanza massima dalla sorgente per la forma circolare è di circa 40 m, sempre che si desiderino curve di eguale intelligibilità della stessa forma.

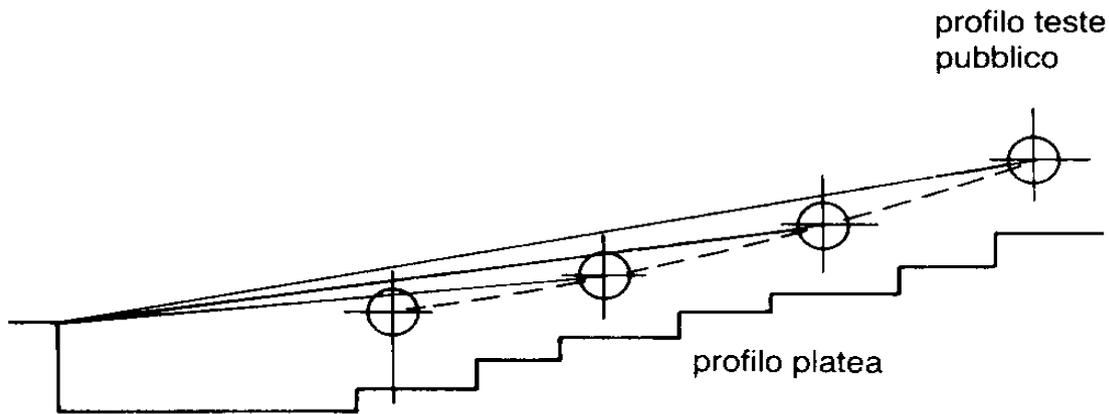


Figura 199: Tracciamento del profilo verticale di una sala

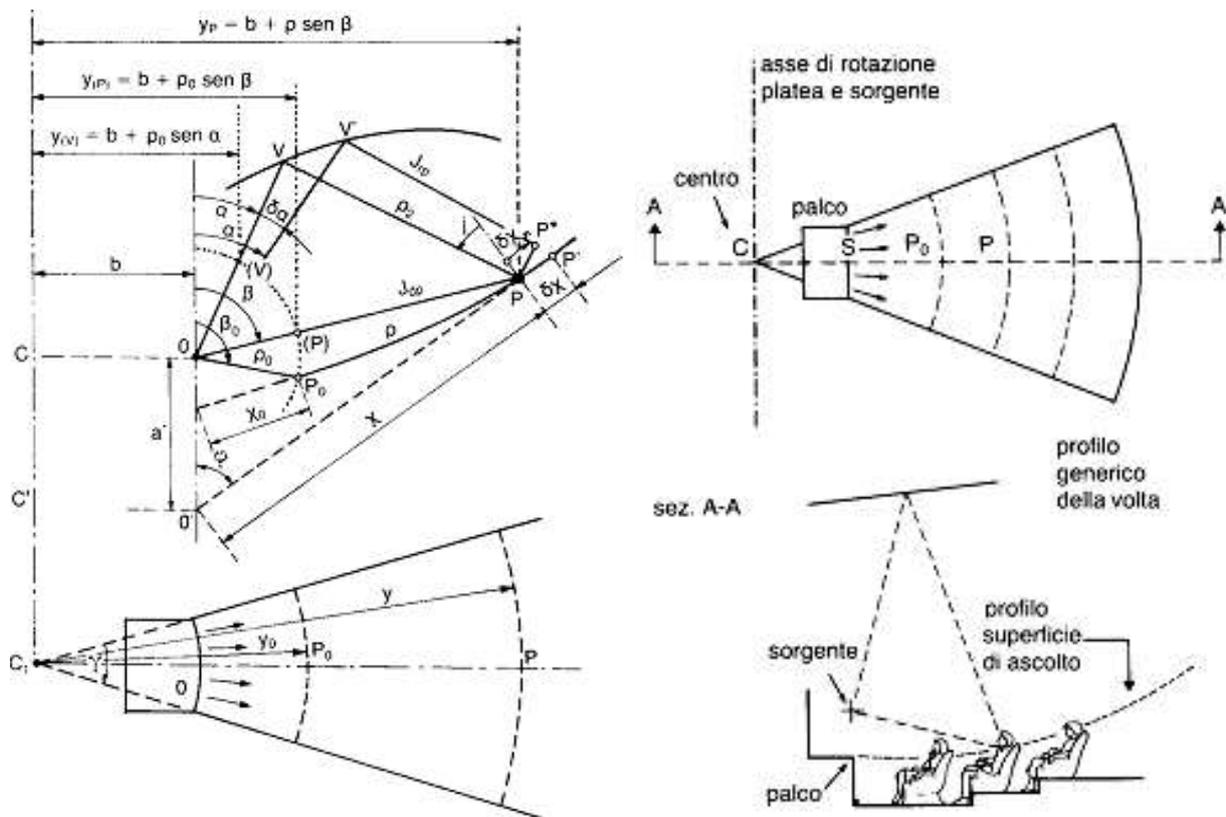


Figura 200: Schema progettuale geometrico delle sale teatrali

All'interno di spazi chiusi la trasmissione della voce viene ridotta drasticamente ad una distanza limite di 15 m ed occorre considerare anche le riflessioni laterali e la riverberazione acustica. Al fine di determinare una possibile forma ottimale occorre prendere in considerazione, come sopra indicato, la *frazione di energia immediata* e l'intelligibilità delle parole.

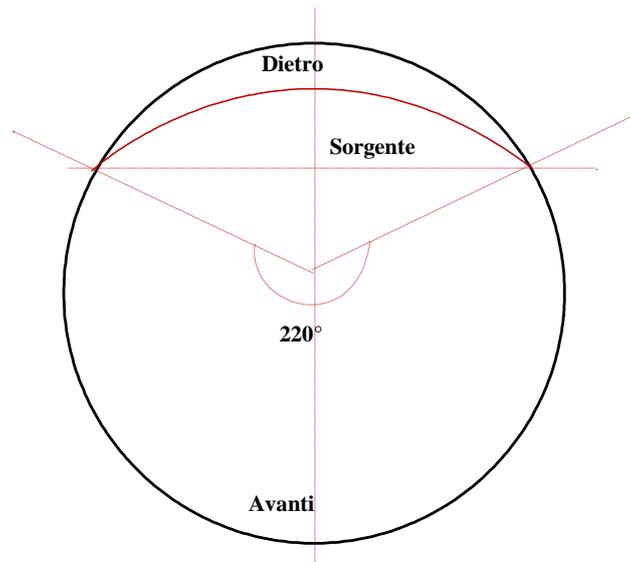


Figura 201: Pianta circolare per teatri

Si è già detto anche che la *frazione di energia immediata* ha il vantaggio di essere facilmente misurabile e calcolabile. Essa consente di suddividere il suono ricevuto dall'ascoltatore nella componente suono *immediato* e *ritardato*, così come si è fatto per gli auditori musicali.

Poiché queste due componenti sono sufficientemente distinte si possono trovare relazioni con la forma architettonica. La componente del suono immediato è data dalla somma del suono diretto e del suono riflesso lateralmente in tempi brevi (<50 ms). Il suono diretto lo si può prevedere assumendo valido il principio della propagazione sferica.

Occorre trovare un modo per imporre che il numero delle riflessioni laterali immediate siano costanti così che possano essere considerate un multiplo del suono diretto. Questo multiplo è detto *rapporto delle riflessioni immediate*. Se le riflessioni immediate sono pari al suono diretto allora tale rapporto vale 2. La componente del suono ritardato è fortemente legata al *tempo di riverberazione* nel senso che un tempo di riverberazione grande produce un maggior numero di riflessioni ritardate che influenzano negativamente l'intelligibilità delle parole.

Secondo la teoria classica il livello sonoro riflesso si mantiene costante per cui assumendo che il livello del suono ritardato sia costante nello spazio<sup>21)</sup> allora il suono ritardato si può presumere che si comporti come un *rumore di fondo* e pertanto il profilo di eguale intelligibilità può nuovamente ritenersi coincidente con quello di eguale livello di pressione.

Purtroppo il suono ritardato nei teatri, come pure nelle sale musicali, non si mantiene costante ma decresce con la distanza dalla sorgente e ciò produce un allungamento delle curve di eguale intelligibilità lungo l'asse principale.

La distanza massima prevedibile, in senso assiale, è pertanto di 30 m. In definitiva i profili tracciati con la nuova teoria tendono ad essere circolari con centro di fronte al parlatore e, supposto il suono ritardato non costante, si ha un allargamento del settore anteriore (vedi figura) da 220° a 260°. La teoria delle linee circolari allungate può produrre, se seguita in senso stretto mediante un involuppo geometrico della sala teatrale, effetti indesiderati di focalizzazione dovuti

21) Non necessariamente lo stesso valore come il suono riflesso ma con un valore sensibile.

alle superfici concave<sup>122)</sup>. Inoltre l'ipotesi di numero costante di riflessioni immediate non è facile da realizzare architettonicamente.

In realtà le forme architettoniche classiche e moderne sembrano esaltare il numero delle riflessioni laterali immediate e ciò favorisce l'ascolto anche nei posti più lontani.

Il criterio delle linee di profilo di eguale intelligibilità ha anche un inconveniente che può portare ad effetti non desiderati. Se l'attore si gira verso il palco le curve di isointelligibilità ruotano con esso e quindi l'allungamento dovrebbe spostarsi in direzione opposta.

Pertanto si può pensare che il profilo migliore è dato da curve circolari semplici e non allungate. Inoltre l'applicazione del solo criterio delle curve di intelligibilità è fortemente selettiva e in alcuni casi può risultare non efficace.

Nelle sale di piccolo volume, infatti, non si hanno grandi difficoltà ad avere una buona intelligibilità poiché basta controllare il solo tempo di riverberazione. Per volumi grandi non basta controllare solamente il tempo di riverberazione ma anche le *riflessioni laterali immediate*.

Il numero delle riflessioni laterali immediate può essere calcolato con il seguente ragionamento: una singola riflessione incrementa lo spazio di intelligibilità di un fattore 1.4 e tre riflessioni di un fattore 2.

Se le superfici debbono orientare le riflessioni laterali immediate verso la sala allora non solo si ha l'incremento dell'energia immediata ma si riducono anche le riflessioni ritardate (riverbero) e quindi l'effetto è duplice.

Le riflessioni ritardate si riducono mantenendo basso il tempo di riverberazione, tenuto in minore considerazione per il linguaggio parlato. Il valore consigliato è sempre stato di 1 secondo e, secondo *Cremer e Muller* (1982) non si hanno grandi benefici a ridurlo al di sotto di questo valore.

Valori del tempo di riverberazione di 0.5 secondi producono un suono troppo secco e poco confortevole. Per risolvere il problema della rotazione del parlatore (e quindi della riduzione dell'onda diretta verso il pubblico) occorre prevedere superfici riflettenti laterali che rinviino le riflessioni verso la sala. In teatri dotati di proscenio si usano superfici laterali e frontali. L'apertura del proscenio influenza la componente del suono ritardato: una parte sensibile dell'energia emessa dall'attore rientra dentro il proscenio e viene quasi del tutto assorbita dall'arredamento interno della scena.

L'energia che passa nella sala è dell'ordine del 40% di quella emessa dall'attore. Per l'energia riflessa immediata si hanno minori perdite perché la maggior parte delle riflessioni in sala provengono dalle pareti laterali della stessa sala. Per teatri con una struttura aperta e con il pubblico anche alle spalle degli attori si possono solo utilizzare solamente superfici sospese. Il comportamento delle gallerie nei teatri è simile a quello nelle sale musicali: le riflessioni immediate sono poco influenzate mentre le riflessioni ritardate diminuiscono man mano che ci si addentra sotto la galleria<sup>123)</sup>.

Per la musica ciò non è desiderabile perché diminuisce la sensazione di spazialità mentre per il linguaggio parlato si ha un incremento della *frazione di energia riflessa immediata* e quindi si migliora l'intelligibilità. Le gallerie sporgenti nei teatri sono dunque accettabili e il limite progettuale è quello visivo.

---

22) Le superfici circolari focalizzano verso il centro, quelle ellittiche focalizzano verso i due fuochi. Una superficie allungata si comporta come la somma delle due forme sopra indicate producendo focalizzazioni verso il centro della sala e verso il fuoco virtuale dovuto allungamento.

23) Questo fenomeno è del tutto analogo a quello che avviene nelle sale musicali.

Va osservato, però, che le gallerie sporgenti comportano anche il rischio di ridurre molto il livello sonoro totale e quindi di diminuire il rapporto *segnale-rumore*. Risulta importante anche misurare il *livello sonoro del parlato* e cercare di riferirlo ad un valore ottimale, così come fatto per la musica.

Solitamente il livello di riferimento è quello a *10 m* dalla sorgente per suono diretto e il requisito minimo per il linguaggio parlato è che esso emerga con un livello di 0 dB. Al fine di raggiungere il tempo di riverberazione ottimale nei teatri non occorre avere altezze così elevate come nei teatri musicali tranne nei casi di sala con elevate angolature del profilo longitudinale e con gallerie che possono portare ad avere un'altezza sul proscenio molto grande.

Occorre, inoltre, prestare attenzione a non usare materiali fortemente assorbenti per non attenuare eccessivamente le riflessioni laterali immediate e quindi per non perdere il rafforzamento del suono diretto. In taluni teatri sono stati usati soffitti ricoperti di materiale assorbenti con buoni risultati.

### 13.4. QUALITÀ ACUSTICHE PROPOSTE DA L. BERANEK

Alcune qualità acustiche suggerite da *L. Beranek* sono definibili mediante giudizi di esperti. Queste qualità sono:

- la **vivezza** o **pienezza** dei toni legata al tempo di riverberazione a media frequenza;
- la **chiarezza** o definizione che definisce la capacità di distinguere suoni che si susseguono nel tempo e che dipende in modo inverso dal tempo di riverberazione;
- l'**intimità** o presenza che fornisce all'ascoltatore la sensazione delle dimensioni spaziali della sala e che dipende dal ritardo fra l'onda diretta e la prima riflessione;
- il **calore** che rappresenta la pienezza dei suoni di bassa frequenza (< 250 Hz);
- la **brillanza** che rappresenta la vivezza di un suono per la presenza di un grande numero di armoniche e si manifesta in un ambiente vivace alle alte frequenze;
- la **diffusione** che rappresenta la spazialità del suono riverberato;
- il **bilanciamento** che rappresenta il giusto peso fra le varie sezioni di un'orchestra;
- la **fusione** che rappresenta la mescolanza dei vari strumenti dell'orchestra;
- l'**accordo** (o ensemble) che rappresenta la capacità dei musicisti di suonare all'unisono e quindi dipende fortemente dalla capacità di sentirsi l'un l'altro;
- l'**attacco** o immediatezza di risposta che indica la prontezza di una sala alla risposta di una nota;
- la **tessitura** che fornisce una sensazione all'ascoltatore del percorso fatto da un'onda sonora e che è legato alle varie riflessioni dell'onda;
- l'**ampiezza** dinamica che rappresenta la differenza di livello acustico fra i suoni più intensi e più flebili percepiti in una sala;
- la **qualità totale** che rappresenta la bellezza del tono;
- l'**uniformità** che fornisce un indice di eguale comportamento della sala e quindi di assenza di zone morte nelle quali il suono non è percepito con sufficiente chiarezza.

Ciascuno di questi indici di qualità è legato ad un giudizio soggettivo e, malgrado gli sforzi fatti dallo stesso *Beranek*, difficilmente correlabili analiticamente alle proprietà geometriche e progettuali di una sala. Queste qualità non sono additive *sic et simpliciter* per cui non possono compensarsi vicendevolmente, come *Beranek* aveva in qualche modo lasciato intravedere.

Questi studi, iniziati a metà degli anni cinquanta, hanno costituito il primo vero passo in avanti nell'acustica delle sale dai tempi di Sabine.

### 13.4.1. IL CRITERIO PROGETTUALE DI L. BERANEK

Leo Beranek fornì, agli inizi degli anni '50, un criterio progettuale basato sulle qualità sonore prima descritte. Detto criterio classificava le sale in base ad un punteggio ottenuto come somma dei punteggi relativi ai 20 parametri di qualità acustici anzidetti.

Secondo questo criterio una sala poteva avere un punteggio basso in un parametro purché questo venisse compensato da qualche altro con punteggi elevati.

In realtà questo criterio forniva risultati validi solo in modo quasi casuale e ancora nel 1970 e 1975 due sale musicali (a New York e a Londra), progettate con il criterio di L. Beranek, furono demolite perché acusticamente non buone e poi riprogettate e ricostruite con i nuovi e moderni criteri progettuali.

Fu dopo questi ultimi clamorosi insuccessi che M. Schroeder, Kremer, ..., iniziarono ad impostare la nuova *Acustica Architettonica*.

Da questi studi, essenzialmente di tipo sistemistico (nel senso di applicazione all'*Acustica della Teoria dei Sistemi*) sono nati i CAD acustici che oggi consentono di padroneggiare tutte le fasi progettuali di una sala musicale o teatrale in genere.

## 13.5. LE PROBLEMATICHE DI UNA SALA MUSICALE

Una sala musicale è un sistema molto complesso che deve soddisfare a requisiti di vario tipo fra i quali si ricordano quelli:

- **Architettonico:** si deve fruire di un volume attrezzato con finalità precise di tipo culturale- edonistico e che deve risultare esteticamente gradevole ed indicativo del tipo di costruzione. Da sempre un teatro, qualunque sia la sua destinazione, ha rappresentato uno status symbol per la città o la nazione che lo ha costruito e pertanto si è cercato di offrire un'opera unica che ne rappresentasse lo stile, la grandezza e ne incarnasse l'anima;
- **Acustico:** il volume attrezzato deve garantire un ascolto ottimale del prodotto musicale che si intende ascoltare. Non è cosa facile definire l'ascolto ottimale essendo questo requisito dipendente da un giudizio soggettivo, cioè legato a valutazioni personali dei singoli individui. Proprio la definizione di criteri soggettivi definisce l'insieme di qualità acustiche tendenziali che, al fine della corretta progettazione della sala, occorre perseguire per l'ascolto ottimale;
- **Funzionale:** ad esclusione delle prime due qualità (che pure rientrano nella funzionalità in genere di una sala), si desidera raggiungere specifiche funzionali ben precise dettate dalla tipologia della sala (per concerto, per opere liriche, per musica da camera, per teatri in genere) e quindi tendenti alla fruibilità, capacità, organicità dei servizi, .... La progettazione di una sala è oggi più che mai una progettazione funzionale e quindi deve essere impostata fin dall'inizio nel modo corretto.

## 13.6. LE VARIABILI IN GIOCO

Abbiamo due insiemi di variabili da correlare.

### Le variabili fisico-oggettive

Cioè le variabili legate alle dimensioni e all'evoluzione di fenomeni fisici ben precisi che possono essere descritti con relazioni di validità generale (dette relazioni oggettive). Il suono è un fenomeno fisico che può essere descritto con leggi pienamente note. L'ambiente nel quale il suono viene generato e trasmesso si comporta anch'esso in modo (almeno teoricamente) fisicamente noto, nel senso che si può pensare di risolvere matematicamente il problema della trasmissione del suono note le equazioni differenziali che la definiscono e le condizioni al contorno. Vedremo alcuni parametri oggettivi in grado di descrivere le fenomenologia della trasmissione sonora all'interno delle sale;

### Le variabili soggettive

Cioè quell'insieme di giudizi che possono essere dati sulle qualità acustiche di una sala. E' proprio quest'aspetto dell'interazione dell'ambiente costruito con l'uomo (ossia con l'interpretazione soggettiva delle prestazioni acustiche della sala) che rappresenta il cambiamento concettuale più importante di questi ultimi tre decenni.

Si é, pertanto, abbandonato l'idea di costruire una sala avendo di mira solamente le sue funzionalità oggettive e si sta sempre più cercando di correlare nel modo migliore l'insieme oggettivo dei dati e quello soggettivo dei giudizi che esprime il gradimento dell'uomo fruitore della sala.

#### 13.6.1. ECCEZIONALITA' DI UN EVENTO MUSICALE

Un'esecuzione musicale rappresenta un evento unico nel tempo sia perché gli esecutori possono essere diversi e/o perché l'esecuzione strumentale di ciascun orchestrale é sempre diversa.

La riproduzione di una registrazione musicale non é mai fedele all'originale in quanto l'acustica della sala di ascolto (che condiziona il campo sonoro di ascolto) é diversa da quella della sala originale di produzione (che ha condizionato il campo sonoro di partenza).

A tutto ciò si aggiunga la complicazione del giudizio soggettivo che é di per sé unico per ciascun individuo e che qui si vuole generalizzare in una forma prevedibile (e quindi analitica) e valida su grande scala.

Occorre, infatti, conciliare lo spazio fisico-oggettivo (cioè le prestazioni della sala) con lo spazio soggettivo (cioè le preferenze dei fruitori): ottimizzare il solo spazio fisico-oggettivo senza tenere conto delle preferenze soggettive equivale a progettare una sala con alta probabilità di insuccesso, come la storia recente della *Royal Festival Hall* di Londra (1951) e della *New York Philharmonic Hall* (1962) hanno dimostrato.

Forse è proprio da questi clamorosi insuccessi che ha preso il via la ricerca attuale sull'*Acustica delle Sale* con i risultati che saranno (almeno parzialmente) esposti nel prosieguo.

Particolarmente interessante sono gli studi che *Y. Ando, M. Barron, J. Bradley, L. Cremer, V.L. Jordan, H.A. Muller, M.R. Schröder* e numerosi altri hanno effettuato e che hanno dato una svolta che si può considerare storica nello studio dell'*Acustica delle Sale*.

La *psico-acustica* é entrata prepotentemente nella definizione di standard operativi e nell'individuazione dello spazio soggettivo di cui si é detto in precedenza.

## 13.7. IL COMPORTAMENTO IDEALE DI UNA SALA

E' lecito chiederci quale sia il comportamento ideale di una sala almeno dal punto di vista fisico-oggettivo. La relazione di W.C. Sabine per il tempo di riverberazione é stata dimostrata analiticamente nell'ipotesi di campo diffuso mediante la teoria statistica della riverberazione.

In pratica l'ipotesi fondamentale é che la diffusione del campo sonoro sia completa (ideale) per il che occorrono che ci siano le seguenti condizioni:

- ***la media temporale della densità di energia in tutti i punti della sala é costante (condizione di omogeneità);***
- ***la direzione di arrivo dei raggi sonori in ciascun punto deve essere egualmente probabile;***
- ***la media temporale del flusso di energia in ciascun punto deve essere costante (queste ultime due definiscono le condizioni di isotropia).***

Le due condizioni di omogeneità e di isotropia sono fortemente correlate ed é lecito pensare che una sala avente forte disomogeneità sia soggetta anche a forte anisotropia. L'omogeneità richiede in pratica che *la densità acustica sia uniforme in tutti i punti della sala* e pertanto (almeno nelle zone non immediatamente vicine alle sorgenti sonore) non debbono esserci zone di addensamento dei raggi acustici o di forte assorbimento degli stessi.

La condizione di isotropia dipende sia dalla forma geometrica della sala che dai materiali utilizzati per i rivestimenti delle pareti. Appare evidente, infatti, che una parete fortemente assorbente condiziona fortemente le condizioni del campo acustico in modo tale da non vedere rispettate le ultime due condizioni.

E pertanto risulta accettabile l'ipotesi che un'uniforme densità acustica richiede anche un comportamento isotropo del locale.

La condizione di *isotropia* é di essenziale importanza per il buon comportamento acustico di una sala tanto che inizialmente si é considerato un buon indice di qualità l'avere un elevato grado di diffusione.

***Una buona progettazione deve tendere al raggiungimento delle due ipotesi di omogeneità e di isotropia mediante l'uso di materiali appropriati e la scelta di geometrie opportune.***

***Considerato che il grado di libertà che queste scelte comportano é elevato si può intuire come una buona progettazione debba essere sempre intesa come un processo di ottimizzazione imperfetto o meglio perfettibile.***

## 13.8. IL FENOMENO DELL'INTERFERENZA

L'interferenza è dovuta all'azione di sovrapposizione delle onde dirette e riflesse da una parete. Questa azione può provocare un rinforzo (ventri) o un indebolimento (nodi) di una onda sonora. La conseguenza è sempre un'azione di disturbo del campo sonoro.

Un effetto del genere, sempre presente all'interno di ambienti, deve essere sempre tenuto sotto controllo facendo in modo che i nodi e i ventri siano quanto più numerosi possibili.

Se, ad esempio, si ha una distribuzione di nodi e ventri con passo dell'ordine del mezzo metro allora due posti adiacenti sentiranno diversamente la stessa rappresentazione sonora.

E' quanto avvenuto nella sala di New York demolita nel 1972. Una sala con pareti fortemente direttive e speculari può dar luogo a questi fenomeni di interferenza. Per questo motivo è bene avere, ove è possibile, pareti convesse (disperdenti) e non concave (concentranti). Le interferenza

sono favorite dalle forme fortemente simmetriche o con un numero ridotto di modi di vibrazione che, per una sala regolare prismatica, è dato da:

$$n = \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2}$$

ove  $n_x, n_y, n_z$  sono interi variabile da 1 a infinito ed  $L_x, L_y, L_z$  sono le dimensioni della sala nelle tre direzioni  $x, y$  e  $z$ .

Questa relazione spiega in modo semplice (ma efficace) perché le sale cubiche sono acusticamente meno buone delle sale a forma di parallelepipedo con le tre dimensioni tutte diverse.

Nell'ottocento le sale a *parallelepipedo* (vedi la sala di Vienna) erano molto usate.

## 13.9. I DESCRITTORI ACUSTICI OGGETTIVI

I moderni criteri progettuali delle sale musicali hanno portato ultimamente alla focalizzazione dell'analisi della risposta acustica oggettiva caratterizzata da una misurabilità e ripetitività strumentale a stimoli acustici preselezionati. Questa risposta è un legame stretto fra causa ed effetto e rappresenta una sorta di firma distintiva (*signature*) della sala, tale da caratterizzarla pienamente nel comportamento acustico. Da essa possono derivarsi molti parametri energetici, alcuni dei quali saranno presentati nel prosieguo.

M. Schröder (1965) ha dimostrato, ad esempio, che anche il tempo di riverberazione può essere proficuamente calcolato dalla risposta impulsiva della sala. La necessità di una descrizione oggettiva si rende necessaria a causa della complessità del legame di causa-effetto sopra indicato.

***La sala tende a creare un campo sonoro distinto nelle varie posizioni e che dipende dall'interazione del suono prodotto con la stessa sala.***

Fra i descrittori proposti risultano di notevole interesse quelli legati al *contenuto energetico* dei segnali e in particolare quelli derivati dalla risposta impulsiva della sala.

I descrittori oggettivi (o parametri energetici) che ci interessano sono anche quelli che hanno significato per l'ascolto: in pratica desideriamo qui studiare come la definizione geometrica e le proprietà acustiche di una sala possano modificare il campo sonoro e come questo venga interpretato dall'uomo (giudizio soggettivo).

La ricerca di parametri oggettivi per la caratterizzazione di una sala è stata lunga e complessa anche per effetto di un risveglio notevole della ricerca nel campo dell'acustica delle sale.

### 13.9.1. TEMPO DI RIVERBERAZIONE

Il primo parametro oggettivo per l'acustica delle sale è stato il ***tempo di riverberazione*** proposto dall'architetto americano W.C. Sabine agli inizi del secolo a coronamento di studi iniziati alla fine del secolo scorso.

Egli comprese per primo l'importanza del fenomeno della riverberazione acustica dovuto agli effetti delle riflessioni multiple all'interno di una sala. Proprio questo fenomeno differenzia, infatti, l'acustica dei teatri all'aperto da quelli al chiuso.

La relazione che Sabine propose<sup>24</sup> é la seguente:

$$RT = \frac{0,161V}{A}$$

con:

$$A = \sum_1^n a_i S_i + \sum_1^j A_{ogg.j} + A_{air}$$

ove:

- $a_i$  é il fattore di assorbimento (detto fattore di Sabine) della superficie  $S_i$ ;
- $S_i$  area della superficie di ogni parete presente,  $m^2$ ;
- $A_{ogg}$  assorbimento equivalente degli oggetti presenti (ad esempio poltrone),  $m^2$ ;
- $A_{air}$  assorbimento equivalente dell'aria,  $m^2$  dato dalla relazione:

$$A_{air} = 4mV(1-\psi)$$

con:

- $m$  coefficiente di assorbimento dell'aria (Neper per metro) vedi tabella seguente:
- $V$  volume dell'ambiente,  $m^3$ ;
- $\psi$  frazione del volume occupata dagli oggetti chiusi.

Le ipotesi di validità di questa relazione sono così riassumibili:

- - sala di forma regolare e campo diffusivo uniforme;
- - volume non tanto grande da esaltare l'assorbimento dell'umidità dell'aria;
- - assorbimento medio non superiore a 0,4.

L'aria assorbe il suono per effetto dell'umidità in essa presente. I figura è rappresentato il fattore di assorbimento  $m$  in funzione dell'umidità relativa e della frequenza del suono. La pressione varia secondo la relazione:

$$p = p_0 e^{-mx}$$

con  $x$  distanza. Si ricordi che la temperatura dell'aria ha influenza sulla celerità del suono,  $c$ , secondo la relazione:

$$c = \sqrt{1 + \frac{t}{273}}$$

espressa in m/s. Il fattore di assorbimento  $m$  è dato da:

$$m = 17 \cdot 10^{-9} \frac{[1 - (t - 20) \cdot 0.04] f_b^2}{\varphi}$$

---

<sup>24</sup> La relazione iniziale di Sabine era  $RT = \frac{0.161V}{\sum a_i S_i}$ . La relazione sopra indicata riprende la definizione più

recente data dalla Norma UNI EN 12354:6.

con  $f_b$  frequenza di centro banda (Hz) e  $\varphi$  l'umidità relativa. Ciò significa che le condizioni ambientali all'interno delle sale influenzano sia la trasmissione del suono che l'assorbimento. Pertanto è importante controllare i parametri ambientali con gli impianti di climatizzazione.

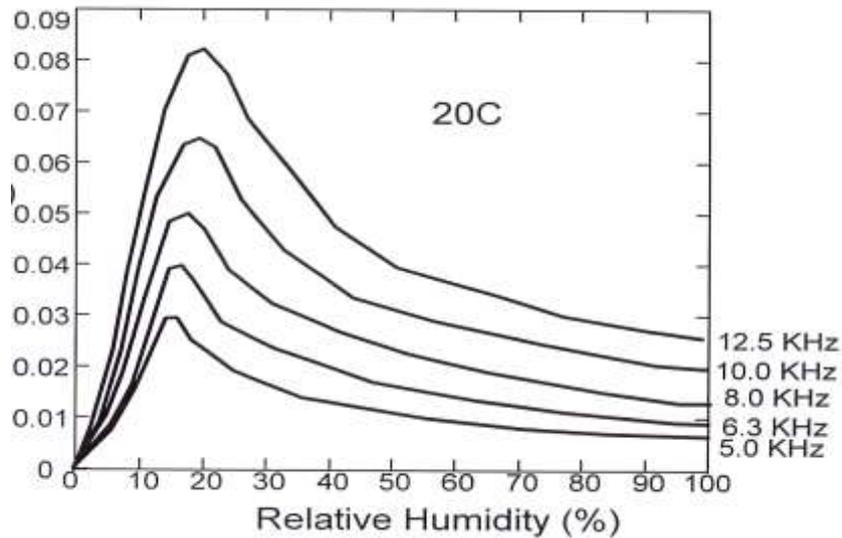


Figura 202: Fattore di assorbimento dell'aria

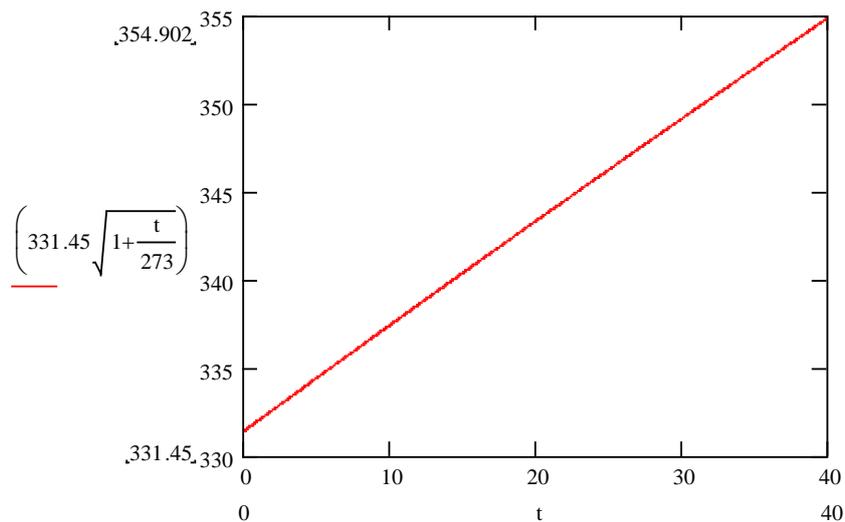


Figura 203: Variazione della celerità dell'aria con la temperatura

Il valore scientifico e culturale di questa relazione é enorme poiché ha dato inizio all'*Acustica delle Sale* in senso moderno ed ha finalmente fornito uno strumento quantitativo di valutazione e di calcolo. Questo parametro é, nelle ipotesi sopra indicate, riferito a tutta la sala e ne rappresenta una sintesi mirabile del comportamento acustico.

	$m$ in $10^{-3}$ Neper per metro, per bande di ottava con frequenza centrale in Hz						
	125	250	500	1 k	2 k	4 k	8 k
10 °C, 30% - 50% di umidità	0,1	0,2	0,5	1,1	2,7	9,4	29,0
10 °C, 50% - 70% di umidità	0,1	0,2	0,5	0,8	1,8	5,9	21,1
10 °C, 70% - 90% di umidità	0,1	0,2	0,5	0,7	1,4	4,4	15,8
20 °C, 30% - 50% di umidità	0,1	0,3	0,6	1,0	1,9	5,8	20,3
20 °C, 50% - 70% di umidità	0,1	0,3	0,6	1,0	1,7	4,1	13,5
20 °C, 70% - 90% di umidità	0,1	0,3	0,6	1,1	1,7	3,5	10,6

Nota: Questi valori sono desunti dai prospetti con il coefficiente di attenuazione dell'assorbimento atmosferico in decibel per chilometro nella ISO 9613-1 per bande di terzo di ottava, dividendo i valori di quei prospetti per 4,343 (=  $10 \lg e$ ). I valori per le bande di ottava sono quelli per la banda centrale di terzo di ottava minore di 1 kHz e quelli per la minore banda di terzo di ottava maggiore di 1 kHz. I valori sono mediati in modo lineare sull'umidità entro il campo indicato.

Tabella 36: Fattori di Neper per metro per l'aria secondo UNI EN 12354:6

Materiale	Coefficiente di assorbimento acustico $\alpha_s$ in bande di ottava, alla frequenza centrale in Hz					
	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Calcestruzzo, mattoni intonacati	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
Mattoni, non intonacati	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
Coperture rigide per pavimenti (per esempio, PVC, parquet) su pavimenti pesanti	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06
Coperture morbide su pavimenti pesanti; $\leq 5$ mm	0,02	0,03	0,06	0,15	0,30	0,40
Coperture morbide su pavimenti pesanti; $\geq 10$ mm	0,04	0,08	0,15	0,30	0,45	0,55
Pavimento in legno, parquet su assi	0,12	0,10	0,06	0,05	0,05	0,06
Finestre, facciata di vetro	0,12	0,08	0,05	0,04	0,03	0,02
Porte (legno)	0,14	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08
Tendaggi traforati; da 0 mm a 200 mm di fronte a superficie rigida <sup>1)</sup>	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
Tendaggi, $< 0,2$ kg/m <sup>2</sup> , da 0 mm a 200 mm di fronte a superficie rigida; minimo tipico <sup>1)</sup>	0,05	0,06	0,09	0,12	0,18	0,22
Tendaggi, materiale intessuto $\approx 0,4$ kg/m <sup>2</sup> , piegato o increspato $> 1:3$ , 0 - 200 mm di fronte a superficie rigida; massimo tipico	0,10	0,40	0,70	0,90	0,95	1,00
Grandi aperture (dimensione minima $> 1$ m)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Griglia dell'aria, area aperta al 50%	0,30	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50

Nota: Questi dati sono basati su pubblicazioni utilizzate in Austria, Danimarca e nei Paesi Bassi.

1) Di fronte a una finestra i valori della combinazione possono aumentare fino ai valori di una tale finestra da sola.

Tabella 37: Fattori di Sabine per alcuni materiali secondo UNI EN 12345:6

Va osservato che nei casi di sala di forma non regolare, ad esempio, per la presenza di gallerie o palchetti laterali, vedi la Figura 204, il tempo di riverberazione calcolato con la relazione sopra indicata può essere errato (sopravvalutato) poiché in essa non si tiene conto degli effettivi percorsi dei raggi acustici. I posti al di sotto della galleria, ad esempio, sono schermati dalle riflessioni dal soffitto dalla prominenza della galleria stessa. Più corretto è il calcolo del tempo di riverberazione effettuato con tecniche di ray tracing con le quali si seguono i percorsi effettivi dei raggi acustici e quindi viene calcolato un tempo di riverberazione corretto.

### 13.9.2. TEMPO DI RIVERBERAZIONE STATISTICO

Il tempo di riverberazione è un parametro globale che presuppone una regolarità geometrica ed una densità acustica uniforme. In queste ipotesi il tempo di riverberazione (RT) è indipendente dalla posizione e può essere calcolato con i metodi dell'acustica statistica e si hanno le seguenti relazioni:

$$RT_{SABINE} = 13.8 \frac{\bar{l}}{c\bar{\alpha}}$$

$$RT_{EYRING} = 13.8 \frac{\bar{l}}{-c \ln(1-\bar{\alpha})}$$

$$RT_{KUTTUFF} = 13.8 \frac{\bar{l}}{-c \ln(1-\bar{\alpha}) \left( 1 + \frac{\gamma^2}{2} \ln(1-\bar{\alpha}) \right)}$$

Con  $\bar{l}$  percorso medio statistico (in metri), RT tempo di riverberazione nelle varie definizioni (in secondi), c la celerità del suono (m/s),  $\alpha$  è il fattore di assorbimento medio,  $\gamma$  la varianza relativa, 13.8 costante empirica (nel sistema S.I.)

Il cammino libero medio, nelle ipotesi dell'acustica statistica, può essere calcolato mediante la relazione:

$$\bar{l} = \frac{4V}{S}$$

Con V ed S volume e superficie totale dell'ambiente.

Elementi	Area di assorbimento acustico equivalente, $A_{obj}$ in bande di ottava, alla frequenza centrale in Hz					
	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Sedia singola, di legno	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04
Sedia singola, imbottita	0,10	0,20	0,25	0,30	0,35	0,35
Individuo di un gruppo, seduto o in posizione eretta, 1 ogni 6 m <sup>2</sup> di area; minimo tipico	0,05	0,10	0,20	0,35	0,50	0,65
Individuo di un gruppo, seduto, 1 ogni 6 m <sup>2</sup> di area; massimo tipico	0,12	0,45	0,80	0,90	0,95	1,00
Individuo di un gruppo, in posizione eretta, 1 ogni 6 m <sup>2</sup> di area; massimo tipico	0,12	0,45	0,80	1,20	1,30	1,40

Nota Questi dati sono basati su pubblicazioni utilizzate in Austria, Danimarca e nei Paesi Bassi.

Tabella 38: Fattori di assorbimento di alcuni oggetti secondo la UNI EN 12354:6

Insieme di elementi	Coefficiente di assorbimento $\alpha_s$ in bande di ottava, alla frequenza centrale in Hz					
	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Fila di sedie da 0,9 m a 1,2 m; legno/materia plastica	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16
Fila di sedie da 0,9 m a 1,2 m; imbottite; minimo tipico	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,50
Fila di sedie da 0,9 m a 1,2 m; imbottite; massimo tipico	0,50	0,70	0,80	0,90	1,0	1,0
Fila di persone sedute da 0,9 m a 1,2 m (pubblico); minimo tipico	0,20	0,40	0,50	0,60	0,70	0,70
Fila di persone sedute da 0,9 m a 1,2 m (pubblico); massimo tipico	0,60	0,70	0,80	0,90	0,90	0,90
Bambini in un'aula con mobili rigidi, 1 per ogni area di 1 m <sup>2</sup>	0,10	0,20	0,25	0,35	0,40	0,40

Nota Questi dati sono basati su pubblicazioni utilizzate in Austria, Danimarca e nei Paesi Bassi.

Tabella 39: Fattori di assorbimento di file di sedie secondo la UNI EN 12354:6

Materiale	Frequenze centrali in bande di ottava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Apertura condotti di ventilazione	0.75	0.80	0.80	0.80	0.85	0.85
Apertura del proscenio	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55
Ghiaia spessore 150 mm	0.15	0.30	0.80	0.42	0.61	0.72
Sabbia asciutta spessore 150 mm	0.24	0.34	0.45	0.62	0.76	0.95
Intonaco acustico, spessore 10 mm, applicato direttamente alle pareti	0.08	0.15	0.30	0.50	0.60	0.70
Intonaco, marmo, piastrelle	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
Pavimento in legno (parquet) su calcestruzzo di cemento	0.04	0.04	0.07	0.06	0.06	0.07
Pavimento in piastrelle, linoleum, asfalto, gomma su calcestruzzo di cemento	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
Superfici di strutture compatte e dure	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05
Superfici fortemente vibranti (pannelli di legno con intercapedine d'aria, ecc.)	0.40	0.20	0.12	0.07	0.05	0.05
Superfici leggermente vibranti (controsoffitti)	0.10	0.07	0.05	0.04	0.04	0.05
Superfici d'acqua (piscina)	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03
Tappeti (altezza del pelo 3,2 mm)	0.05	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40
Tappeti (altezza del pelo 6,4 mm)	0.05	0.10	0.15	0.30	0.50	0.55
Tappeti (altezza del pelo 10 mm)	0.09	0.10	0.20	0.30	0.55	0.55
Tenda in velluto drappeggiata per il 50% della sua superficie	0.12	0.25	0.52	0.70	0.75	0.77

Tabella 40: Fattori di assorbimento di alcuni materiali

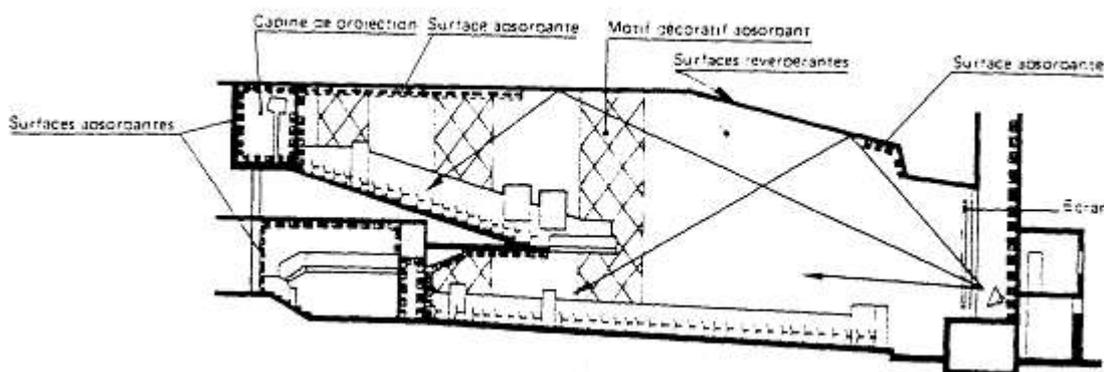


Figura 204: Esempio di sala teatrale con galleria

### 13.9.3. CARATTERISTICHE DEL TEMPO DI RIVERBERAZIONE

Si è già sottolineato come il tempo di riverberazione (fin dall'inizio intuito da Sabine come parametro energetico) sia rimasto per lungo tempo l'unico parametro utilizzato per l'acustica delle sale ed anche l'unico ad essere misurabile con relativa facilità.

In realtà una progettazione che tenga conto del solo tempo di riverberazione può produrre specifiche generali per il solo volume della sala; la forma che questa assume è scarsamente rilevante e non è considerata nel calcolo dello stesso tempo di riverberazione, così come è irrilevante la presenza di schermi riflettenti o la disposizione delle superfici assorbenti.

Molti progettisti hanno considerato questo fatto come una specie di carta bianca per potere scegliere liberamente la forma architettonica da assegnare alle sale musicali senz'altro vincolo se non il rispetto del solo tempo di riverberazione e del rispetto delle linee visive.

Tutto ciò ha prodotto spesso risultati non sempre accettabili e pur tuttavia pochi progressi sono stati fatti nella direzione della buona progettazione nel corso di numerosi decenni.

Si osservi ancora che il *tempo di riverberazione* di Sabine non tiene conto di eventuali effetti di concentrazione dovuti alle forme delle pareti o delle coperture. Ad esempio, con riferimento alla Figura 205 si può osservare che la forma emisferica della copertura provoca una concentrazione delle onde riflesse verso una zona puntiforme. In questo modo l'ascolto è ottimale solo in quel punto di concentrazione.

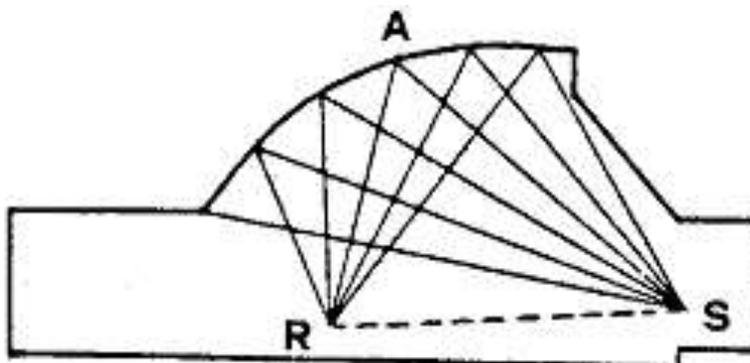


Figura 205: Forma emisferica della copertura con effetto concentrante

Allo stesso modo le forme ellittiche hanno due fuochi verso i quali si riflettono le onde provenienti dalla copertura. E' sempre opportuno evitare superfici convesse con elevati fattori di concentrazione, come indicato in tutte le foto dei moderni teatri.

La forma della sala è risultata fondamentale al crescere delle dimensioni della sala medesima non potendosi più utilizzare semplici considerazioni di *omotetia* con sale più piccole (al di sotto di 1000 posti). Le implicazioni della formula di Sabine per il tempo di riverberazione sono ben distinte per le sale musicali.

Il tempo ottimo per sale per musica sinfonica, alle medie frequenze, è ritenuto essere compreso fra 1,8 e 2,2 secondi, sebbene in qualche caso può risultare necessario prevedere tempi anche maggiori, specialmente nel progetto di riflessioni dirette.

Tempi così lunghi si possono raggiungere con sale di grande volume, soffitti alti più di quanto necessario per gli scopi visivi. Per esempio in una sala senza galleria e con il pavimento tutto ricoperto di orchestrali e pubblico si richiede un'altezza di almeno 13 m. Alla luce delle moderne teorie sull'acustica delle sale il tempo di riverberazione alle varie frequenze dovrebbe variare secondo quanto indicato nella curva di figura seguente.

Materiale	Frequenza (Hz)				
	125,00	250,00	500,00	1000,00	2000,00
Pubblico ed orchestra	0.39	0.57	0.80	0.94	0.92
Poltrona tappezzata, vuota	0.32	0.50	.073	0.87	0.85
Poltrone rivestite in pelle leggera, vuota	0.12	0.20	0.28	.034	.034
Intonaco o legno spesso <sup>1)</sup>	0.19	0.14	0.09	0.06	0.06
Intonaco su blocchi di calcestruzzo <sup>1)</sup>	0.12	0.09	0.07	0.05	0.05
Calcestruzzo o cemento a faccia vista	0.02	0.02	0.02	0.04	0.05
Pannelli in legno leggero <sup>1)</sup>	0.42	0.21	0.10	0.08	0.06
Tendaggi, drappaggi	0.06	0.31	0.44	0.80	0.75

<sup>1)</sup> Dati rilevati da Beranek (1969)  
<sup>2)</sup> Vedi § 4.5

Tabella 41: Valori di assorbimento di alcuni materiali

Ad alte frequenze vi è un inevitabile decremento dovuto all'aumentare del fattore di assorbimento dei materiali: è bene però cercare di installare il minimo dei materiali assorbenti onde ottenere più brillantezza della sala. Un incremento del tempo di riverberazione alle basse frequenze contribuisce ad accrescere il senso di calore: si raccomanda a 125 Hz un valore più elevato del 50% rispetto a quello delle frequenze intermedie.

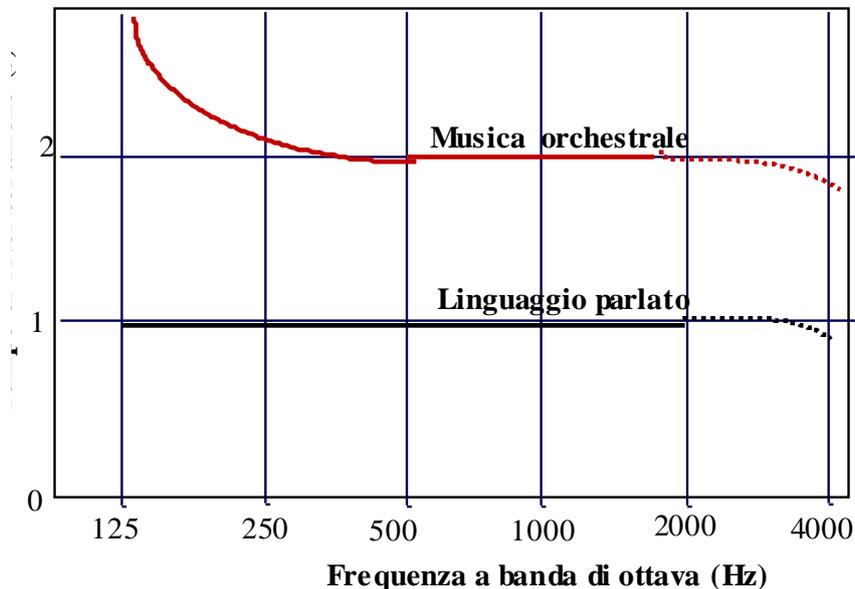


Figura 206: Tempi di riverberazione ottimali per vari usi della sala

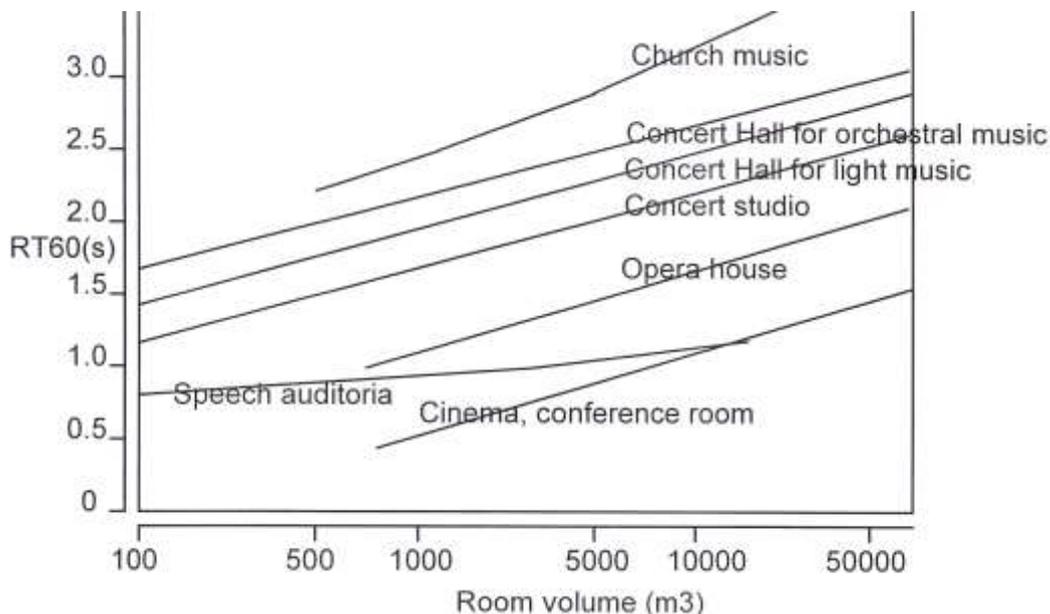


Figura 207: Tempo di riverberazione ottimale di una sala

Spesso è sensibilità del progettista ed una sua scelta preferenziale avere tempi di riverberazione alle basse frequenze diversi da quelli indicati sopra. Poiché l'assorbimento dei materiali diminuisce con la frequenza, l'incremento del tempo di riverberazione è automatico nelle sale massivamente arredate. Le difficoltà di una buona progettazione acustica crescono sensibilmente al crescere del numero di posti: si consiglia un numero massimo di 3000 posti come valore assoluto. Oltre tale limite i problemi progettuali divengono veramente ardui da superare. In realtà non è tanto importante il numero di spettatori quanto l'area occupata da essi poiché è questa che determina in modo preponderante l'assorbimento totale che influenza il tempo di riverberazione e il livello sonoro totale.

### 13.9.4. VALORI SPERIMENTALI DEI FATTORI DI ASSORBIMENTO

Attraverso alcune misure effettuate in sale non occupate, con la fossa orchestrale vuota (nei *Teatri Bellini di Catania, Verdi, Pollini, Massimo di Palermo*), con poltrone imbottite altamente assorbenti, si sono calcolati i fattori di assorbimento utilizzando i risultati sperimentali e la modellazione acustica (CAD).

Materiali	Frequenze [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Gesso	0.29	0.10	0.05	0.04	0.07	0.09
Parquet	0.04	0.04	0.07	0.06	0.06	0.07
Intonaco	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
Moquette	0.05	0.08	0.17	0.30	0.48	0.72
Legno scanalato	0.43	0.40	0.36	0.44	0.33	0.27
Blocchi di cemento	0.36	0.44	0.31	0.29	0.39	0.25
Poltrone imbottite	0.54	0.66	0.78	0.85	0.83	0.75
Velluto	0.14	0.35	0.55	0.72	0.70	0.65

Coefficienti di assorbimento dei materiali di rivestimento usati nella modellazione.

Tabella 42: Fattori di assorbimento sperimentali di alcuni materiali

E' stato usato un analizzatore a tempo reale per catturare e filtrare per bande d'ottava la risposta impulsiva, che successivamente è stata trasferita ad un computer; i tempi di decadimento sono stati calcolati dalle curve di regressione dei minimi quadrati approssimate alle porzioni delle curve di decadimento ottenute con il metodo dell'integrazione inversa proposto da Schröder.

### 13.9.5. RIFLESSIONE E DIFFUSIONE ACUSTICA DELLE PARETI

La riflessione o la diffusione pura nei materiali reali non si verifica quasi mai. In genere il loro comportamento è misto, come mostrato nella successiva figura. In pratica associata alla riflessione in una direzione si ha anche una diffusione orientata nella direzione di riflessione.

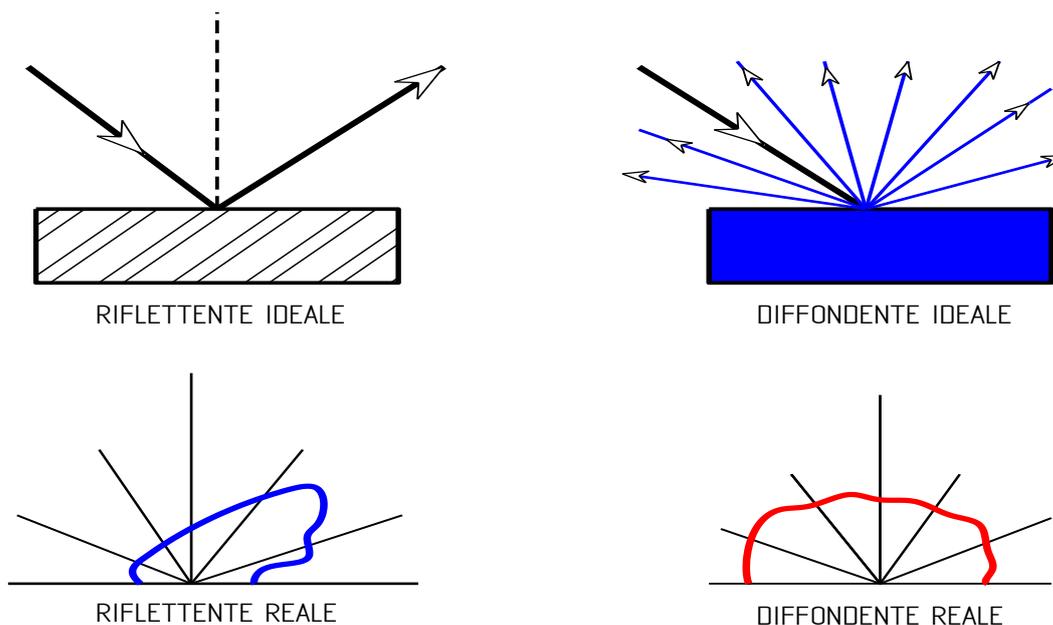


Figura 208: Comportamento riflessivo e diffusivo dei materiali

Allo stesso modo un materiale difficilmente diffonde in modo omogeneo ed uniforme ma con una distribuzione che dipende sia dal materiale che dalla superficie.

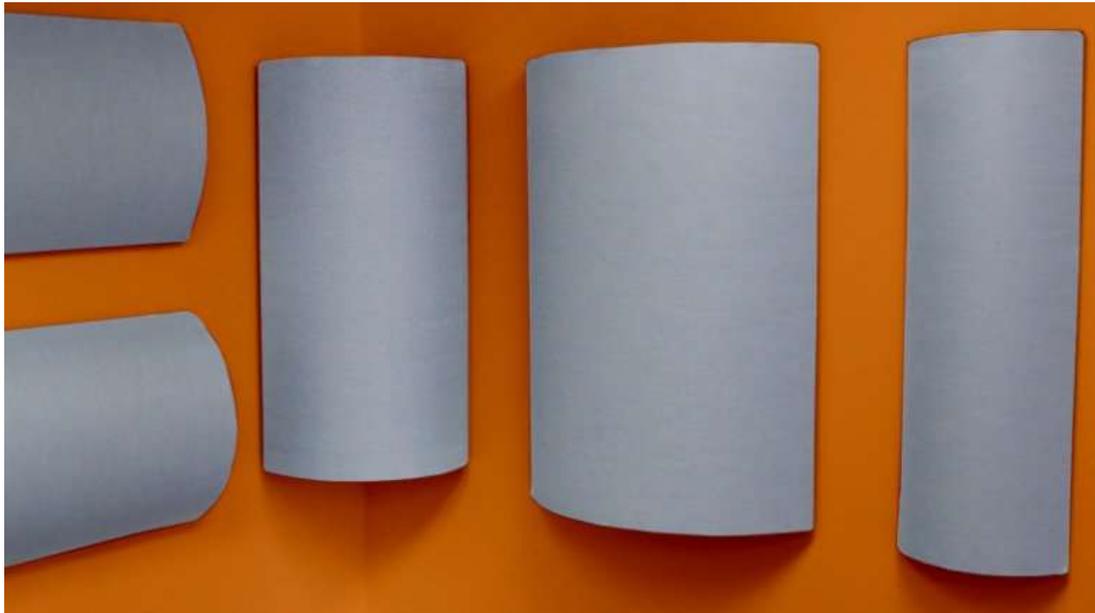


Figura 209: Esempio di materiali diffondenti

### 13.9.6. UTILIZZO DEI MATERIALI ALL'INTERNO DELLA SALA

Le sale teatrali sono sistemi di amplificazione naturale nel senso che la percezione sonora in ogni punto di esse è affidata solamente all'acustica (quindi insieme di forme geometriche e materiali). Il suono proveniente dal palcoscenico deve essere distribuito all'interno senza perdite di potenza e per fare queste occorre evitare l'assorbimento del suono utilizzando materiali assorbenti là dove non strettamente necessario.

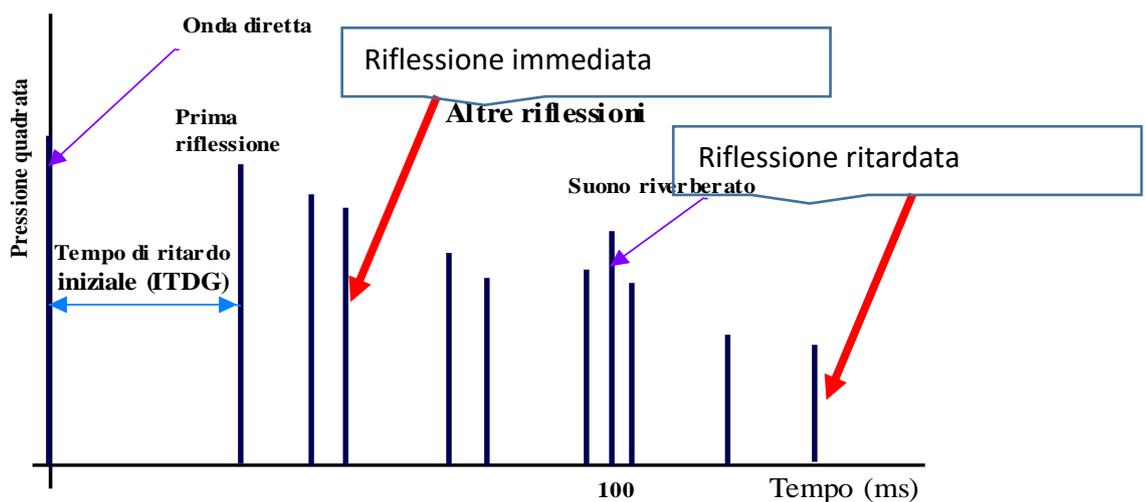


Figura 210: Ecogramma tipo di una sala teatrale

Di norma la parete di scena (cioè dietro il palco) deve essere riflettente per rafforzare il suono inviato verso la sala. La parete di fondo (solitamente la più lontana) non deve essere riflettente perché darebbe luogo a tempi di riflessione lunghi con il rischio di peggiorare l'acustica della sala.

La parete di fondo allora deve essere diffondente, cioè deve disperdere il suono nelle immediate vicinanze in ciò contribuendo al mantenimento del livello di potenza. Se fosse di tipo assorbente allora si avrebbe una riduzione di potenza sul fondo della sala. La stessa osservazione va fatta per le pareti laterali se queste sono fra loro molto distanti e quindi possono generare onde riflesse con tempo oltre 150 ms.

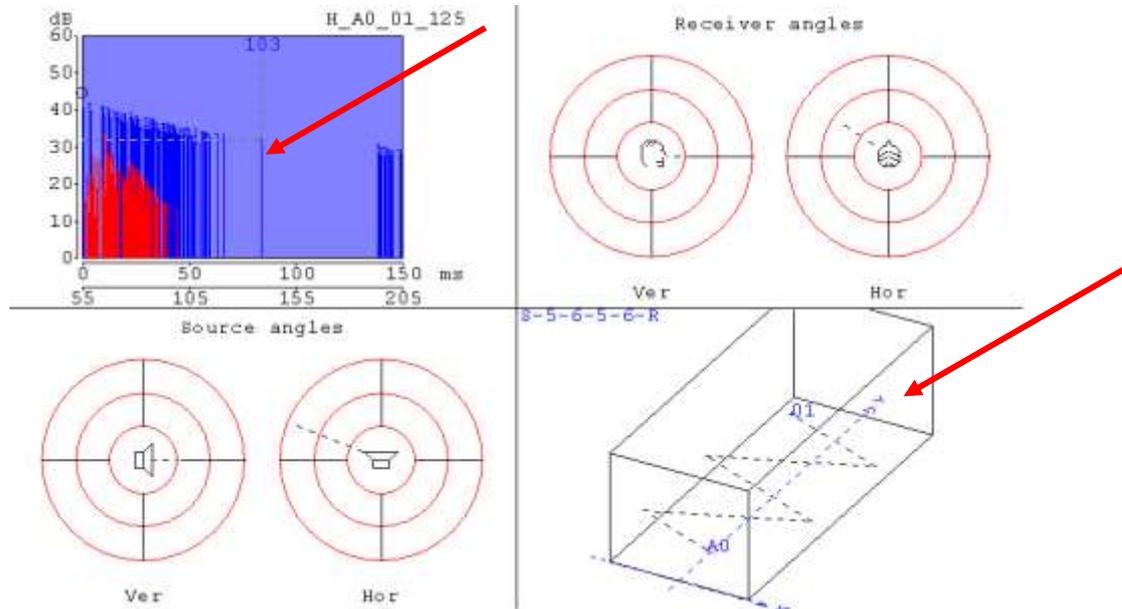


Figura 211: Esempio di riflessione ritardata per effetto di riflessioni multiple laterali

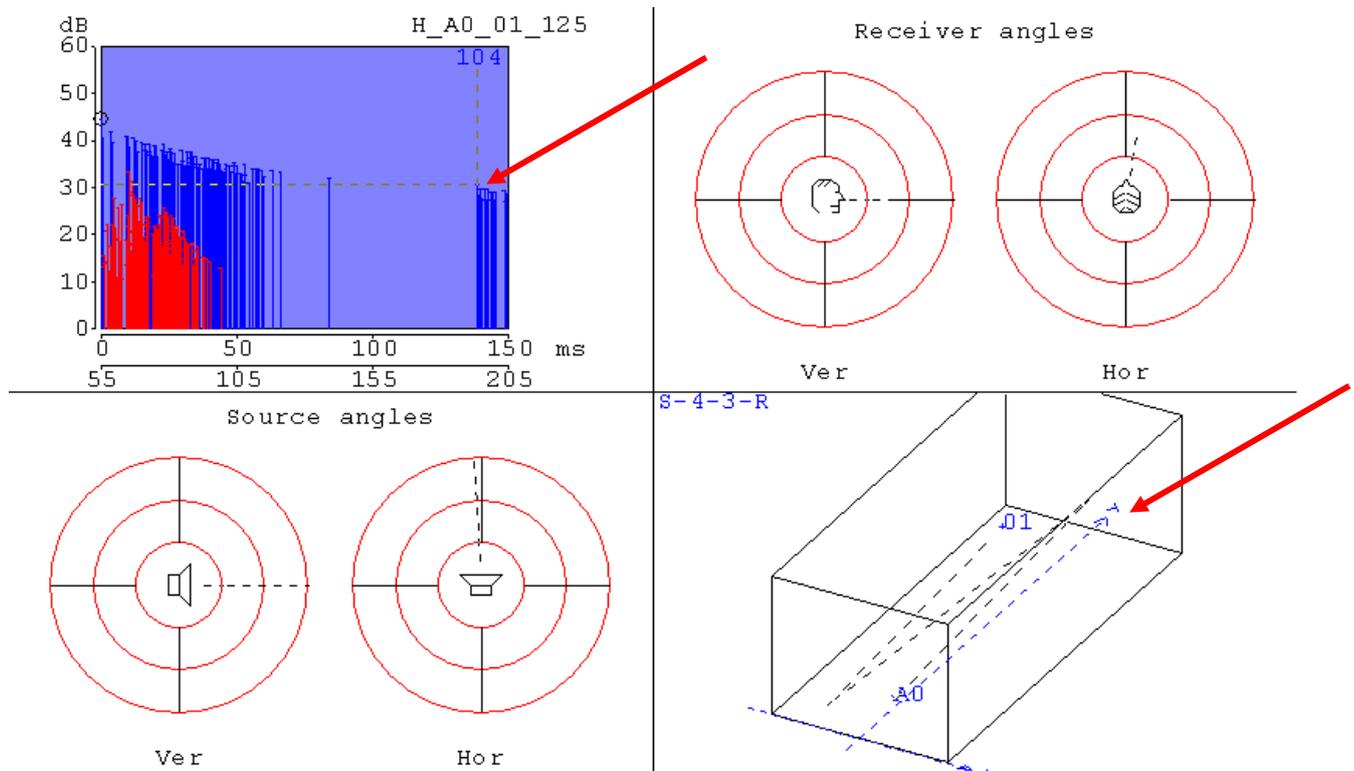


Figura 212: Esempio di riflessione ritardata per effetto di riflessioni multiple delle pareti di fondo

## 13.10. DISTRIBUZIONE DEL LIVELLO SONORO

Il livello totale (*loudness*) è un fattore importante ai fini di una buona acustica nelle sale (M. Barron, 1973) anche se per molti anni esso non è stato ritenuto di grande peso. Per il linguaggio parlato il livello sonoro deve essere sufficientemente elevato rispetto al rumore di fondo. Nel caso di sale musicali molti ascoltatori sembrano reagire in modo entusiastico ad un suono più intenso.

Il senso soggettivo di *loudness* è determinato dal livello sonoro oggettivo, misurato in decibel. La teoria tradizionale della riverberazione produce anche una relazione per calcolare la distribuzione del livello totale sonoro.

Naturalmente la distribuzione del livello sonoro dipende da quello di emissione ma anche dalle caratteristiche acustiche della sala. Sia la distanza dalla sorgente che l'assorbimento totale influenzano il livello totale. Quest'ultimo è somma di due componenti: il livello dovuto al suono diretto e quello dovuto al suono riflesso.

Il suono diretto decade di 6 dB ad ogni raddoppio della distanza mentre il suono riflesso si può considerare grosso modo costante nello spazio. La componente riflessa è funzione dell'assorbimento totale: un sala musicale con una grande platea ha un livello sonoro più basso. La distanza per la quale le componenti diretta e riflessa sono eguali è detta raggio di riverberazione ed è circa **5 m** per una sala musicale normale. Ciò significa, considerate le normali dimensioni dei teatri, che la maggior parte degli ascoltatori riceve energia sonora più attraverso le riflessioni laterali che dal suono diretto.

Quanto detto presuppone una certa uniformità nella distribuzione sonora. Spesso alcune anomalie geometriche causano un allontanamento da questa ipotesi. Ad esempio sotto la galleria si ha un livello sonoro inferiore che non nella sala.

Ciò porta a considerare solo approssimativa l'ipotesi di componente riflessa costante. Misure recenti (Barron e Lee, 1982) hanno mostrato una diminuzione del livello della componente riflessa con la distanza con un difetto di 3 dB nella parete di fondo rispetto alla teoria classica.

Questa differenza è senza dubbio significativa se si pensa che un raddoppio delle dimensioni dell'orchestra produce un incremento del livello sonoro di 3 dB. Gli ascoltatori compensano psicologicamente questa diminuzione del livello se hanno l'impressione di un campo sonoro intenso e la presenza di riflessioni vicine contribuisce a formare questa convinzione (Barron, 1983).

### 13.10.1. LE PROBLEMATICHE DEI DESCRITTORI OGGETTIVI

Uno dei maggiori problemi incontrati con i descrittori oggettivi è che essi non sono immediatamente fruibili come lo è stato il tempo di riverberazione: esso, infatti, è sufficientemente generalizzato per tutta la sala e poco dipendente (nell'ipotesi di campo sonoro diffuso) dalla posizione di ascolto. Il tempo di riverberazione è certamente un parametro distintivo e caratteristico di una sala, facilmente misurabile o calcolabile anche in fase progettuale e ciò giustifica il successo avuto fin dalla sua proposizione da parte di W.C. Sabine.

Le nuove misure oggettive sono quasi sempre fortemente dipendenti dalla **posizione** di ascolto o della sorgente sonora e l'utilizzo di un valore medio è spesso di poca utilità. Inoltre mentre il tempo di riverberazione è facilmente misurabile con apparecchiature commerciali standard (fonometro e registratore di livello) e i risultati sono di immediata interpretazione, ciò non si può dire dei nuovi descrittori oggettivi che richiedono apparecchiature speciali e costose e necessitano di un'analisi interpretativa quasi sempre non semplice e rapida.

E ancora i nuovi descrittori oggettivi non sono spesso calcolabili a priori dai dati architettonici, come invece può farsi con il tempo di riverberazione.

Tutto ciò ha limitato la loro diffusione a pochi specialisti in grado di avere le apparecchiature sofisticate necessarie e i programmi di calcolo per la loro valutazione.

Tuttavia il grande vantaggio dei descrittori oggettivi è di potere fornire indicazioni analitiche (e non solo lessicali o qualitative, come fatto da *Beranek*) di *qualità acustiche* delle sale e dell'ascolto che altrimenti non potrebbero essere date. Il numero dei descrittori suggeriti negli ultimi tempi è andato sempre crescendo: in questa sede si considerano alcuni fra quelli più accettati o consolidati e utilizzati nella pratica.

Il *tempo di riverberazione* di W.C. Sabine, pur se definito e richiamato in numerose occasioni, lo si ritiene un concetto già noto.

### 13.11. NUOVO APPROCCIO ALL'ACUSTICA DELLE SALE

La sala può essere rappresentata come in Figura 213. Essa riporta un sistema fisico che sollecitato a determinati ingressi (segnali acustici) fornisce risposte (uscite) determinate dal proprio comportamento fisico-acustico. La conoscenza del legame fra ingresso ed uscita dei segnali consente di prevedere il comportamento acustico della sala.

Nella Figura 213 è rappresentato lo schema equivalente di un sistema acustico avente in ingresso un segnale di eccitazione di tipo impulsivo e in uscita la risposta della sala a tale segnale detta risposta impulsiva. Purtroppo il segnale teorico impulsivo non può essere generato nella pratica: non si dispone, infatti, di un segnale reale di durata così bassa e con contenuto energetico tale da eccitare sufficientemente la sala. Si ricorre spesso a segnali pseudo-impulsivi costituiti da emissioni sonore di breve durata (ma non istantanea) e di forte intensità, per quanto possibile.

Si usano, ad esempio, spari con pistole caricate a salve o scariche elettriche amplificate mediante altoparlanti omnidirezionali. Va però sottolineato che nessuno di questi segnali può effettivamente considerarsi impulsivo e che pertanto la risposta della sala non è la risposta impulsiva vera e propria.

Oggi si utilizzano metodi di eccitazione della sala che fanno uso di sequenze di segnali di piccola intensità (sequenze di *Galois* o le sequenze di massima lunghezza).



Figura 213: Schematizzazione del nuovo approccio all'Acustica delle Sale

L'andamento in scala lineare del segnale di risposta della sala all'impulso è del tipo riportato in figura. In esso sono già visibili le tracce dell'onda diretta e delle varie riflessioni pervenute al microfono posto nella posizione di ascolto.

Utilizzando la scala dei tempi é anche possibile determinare il ritardo fra l'onda diretta e le varie onde riflesse.

Una sala per teatro o per auditorium può essere vista come un sistema complesso e quindi trattato con i metodi classici della Teoria dei Sistemi. In quest'ottica si può immaginare la sala come una scatola nera (black box) che riceve in ingresso uno stimolo acustico (segnale di ingresso) e fornisce in uscita il campo sonoro di ascolto all'interno della sala.

L'interazione del segnale di ingresso con la sala risulta molto complesso da prevedere anche perché l'interazione delle onde acustiche con i materiali di rivestimento e con gli oggetti presenti nella sala dipende dalla loro lunghezza d'onda.

Si dimostra, però, che se si conosce di un sistema qualsivoglia la risposta ad un segnale impulsivo (un segnale che in pratica si realizza con una forte intensità ma in un brevissimo intervallo di tempo) allora (teorema di *Duhamel*) si può avere la risposta a qualunque segnale mediante un integrale di convoluzione del segnale dato con la risposta all'impulso. Su questo teorema si basa lo studio della risposta impulsiva  $h(t)$  delle sale.

In pratica nota la risposta  $h(t)$  in un punto della sala si può sapere a priori quale sarà la risposta se al posto della sorgente impulsiva si mette un segnale puro (registrato in camera anecoica in modo da non avere effetti riflessivi esterni).

Con i moderni sistemi di simulazione si può, ad esempio, direttamente sentire in cuffia quale sarà il suono reale che un ascoltatore seduto nel punto considerato potrà sentire.

La risposta impulsiva può essere rappresentata anche in scala logaritmica, come nella figura sottostante. In essa sono ben visibili gli istanti di arrivo delle onde dirette e riflesse nonché il decadimento temporale del segnale.

Questa risposta é un legame stretto fra causa ed effetto e rappresenta una sorta di firma distintiva (*signature*) della sala, tale da caratterizzarla pienamente nel comportamento acustico. Da essa possono derivarsi molti parametri energetici, alcuni dei quali saranno presentati nel prosieguo.

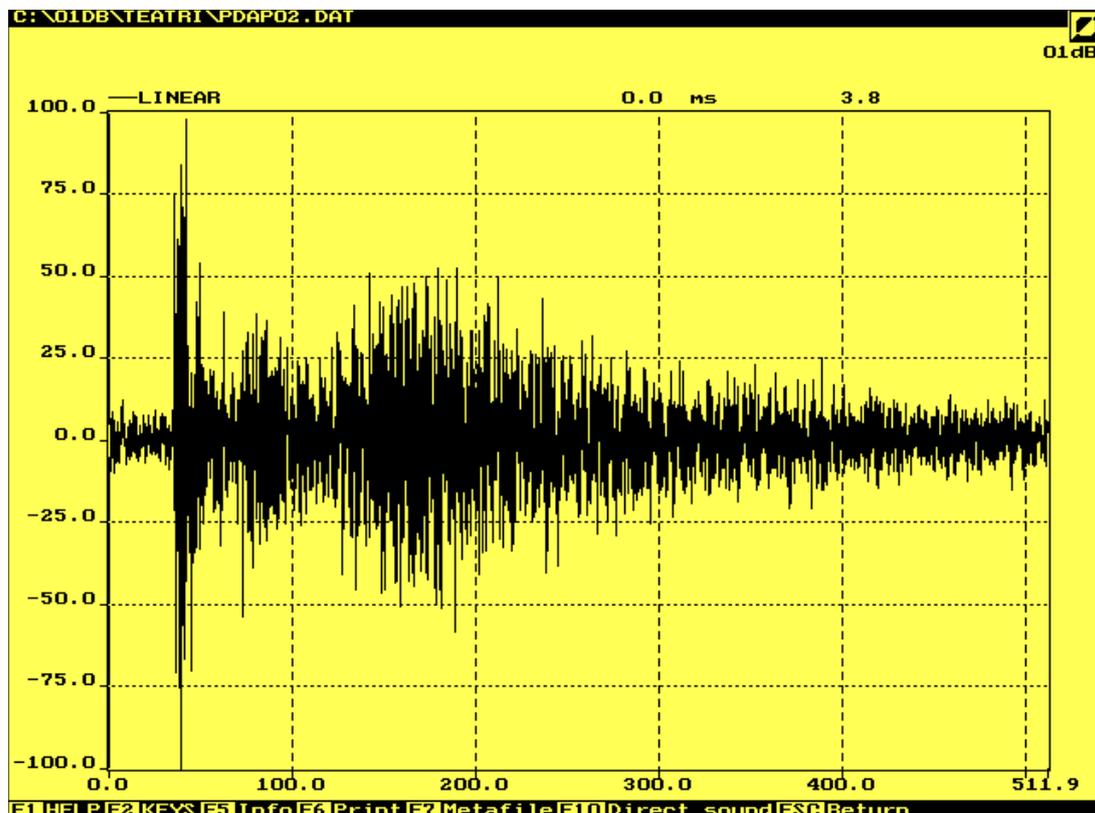


Figura 214: Risposta impulsiva di una sala

M. Schröder (1965) ha dimostrato, ad esempio, che anche il tempo di riverberazione può essere proficuamente calcolato dalla risposta impulsiva della sala.

La necessità di una descrizione oggettiva si rende necessaria a causa della complessità del legame di causa-effetto sopra indicato. La sala tende a creare un campo sonoro distinto nelle varie posizioni e che dipende dall'interazione del suono prodotto con la stessa sala.

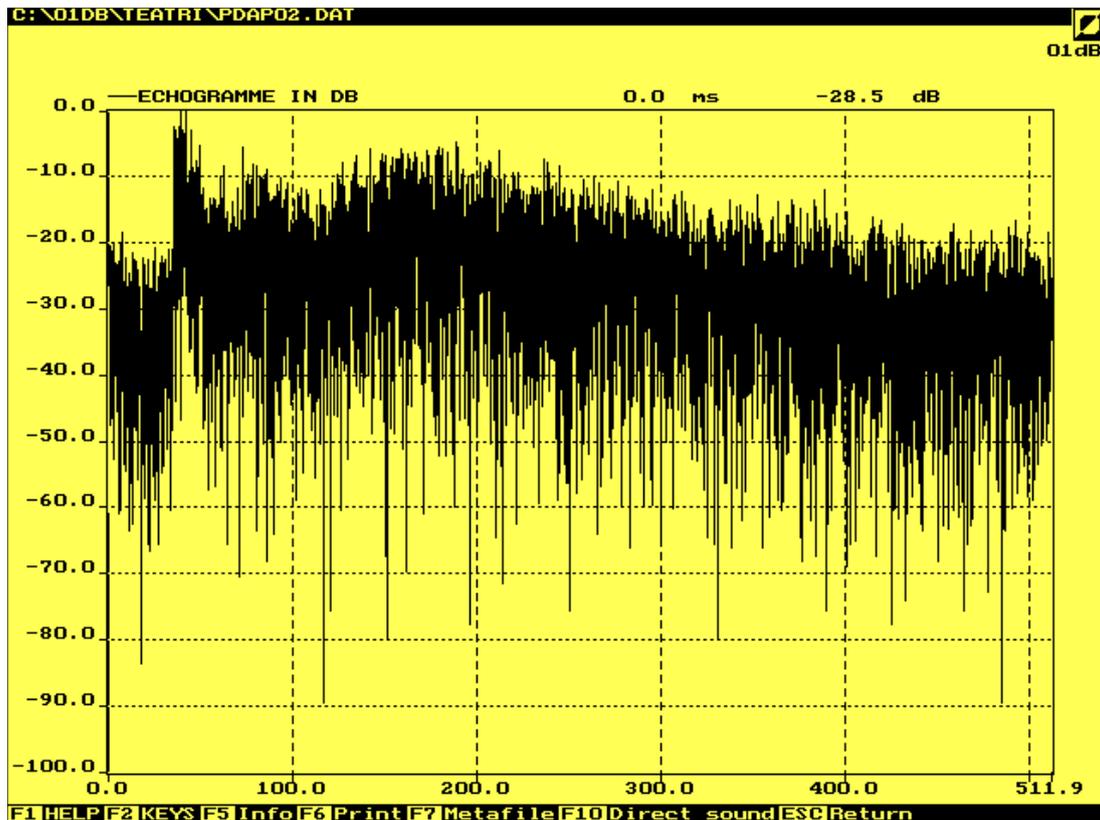


Figura 215: Risposta impulsiva logaritmica

### 13.11.1. INFORMAZIONI OTTENIBILI DALLA RISPOSTA IMPULSIVA

Nella Figura 216 sono rappresentati due *ecogrammi* (meglio detti anche *reflectogrammi*) di una stessa sala musicale ma in due siti diversi: in a) si ha l'ecogramma rilevato della risposta impulsiva in un posto vicino alla sorgente e in b) si ha l'ecogramma in un posto lontano dalla sorgente. Nei posti vicini alla sorgente il suono diretto è dominante rispetto alle riflessioni laterali che sono ben distinti e nette. Nei posti lontani le riflessioni immediate sono addensate e intense quasi quanto il suono diretto.

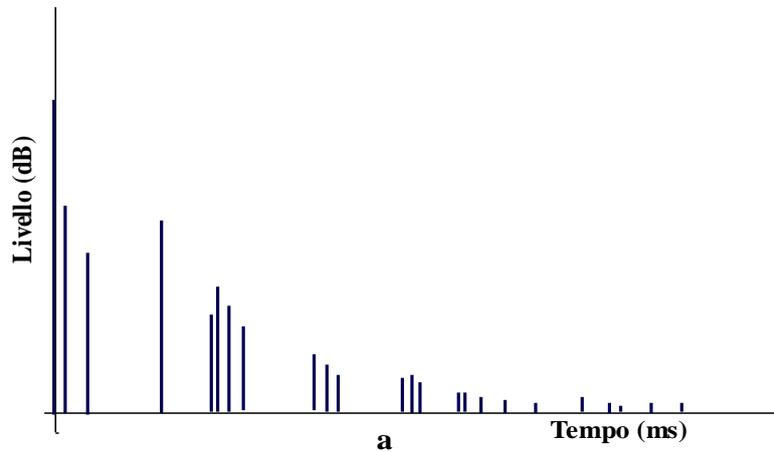
Molti dei descrittori oggettivi possono essere derivati dalla risposta impulsiva della sala. Ogni descrittore energetico si basa sul calcolo di frazioni di energia di decadimento che si possono calcolare dalla risposta quadratica della pressione mediante semplice integrazione.

In pratica basta calcolare l'area sottostante i picchi nell'ecogramma.

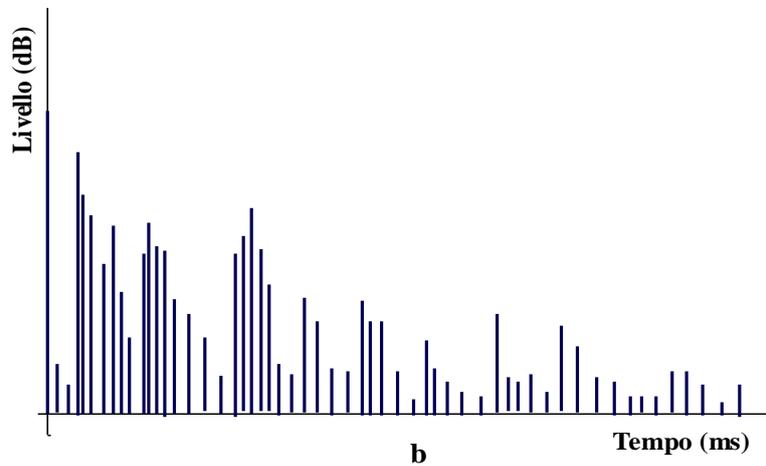
In figura è illustrato un tipico esempio di calcolo dell'*RT* (o anche *T60*) e l'*EDT* (detto anche *T10*) noto l'ecogramma: assegnata la curva integrale con tempo inverso basta calcolare la pendenza della curva da 0 a -60 dB.

Con questo metodo si ottiene il vantaggio di una curva integrale che non contiene fluttuazioni casuali come avviene nei normali diagrammi di decadimento del livello sonoro.

Pertanto il metodo di calcolo (detto di *Schröder*) risulta oggi molto utilizzato per la sua maggiore affidabilità e relativa facilità con strumenti adeguatamente predisposti.



Poltrona vicina alla sorgente sonora



Poltrona lontana dalla sorgente sonora

**Risposta impulsiva (quadrato della pressione)**

Figura 216: Schematizzazione della risposta impulsiva: Il refllettogramma

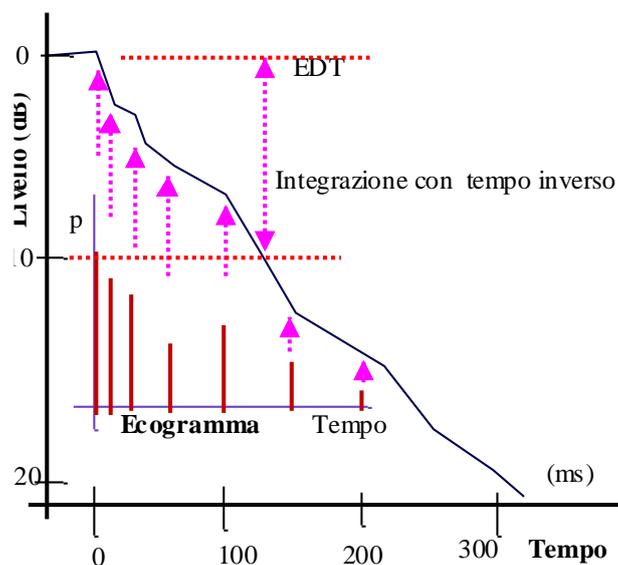


Figura 217: Calcolo dei descrittori oggettivi dalla risposta impulsiva: Integrale inverso di Schröder

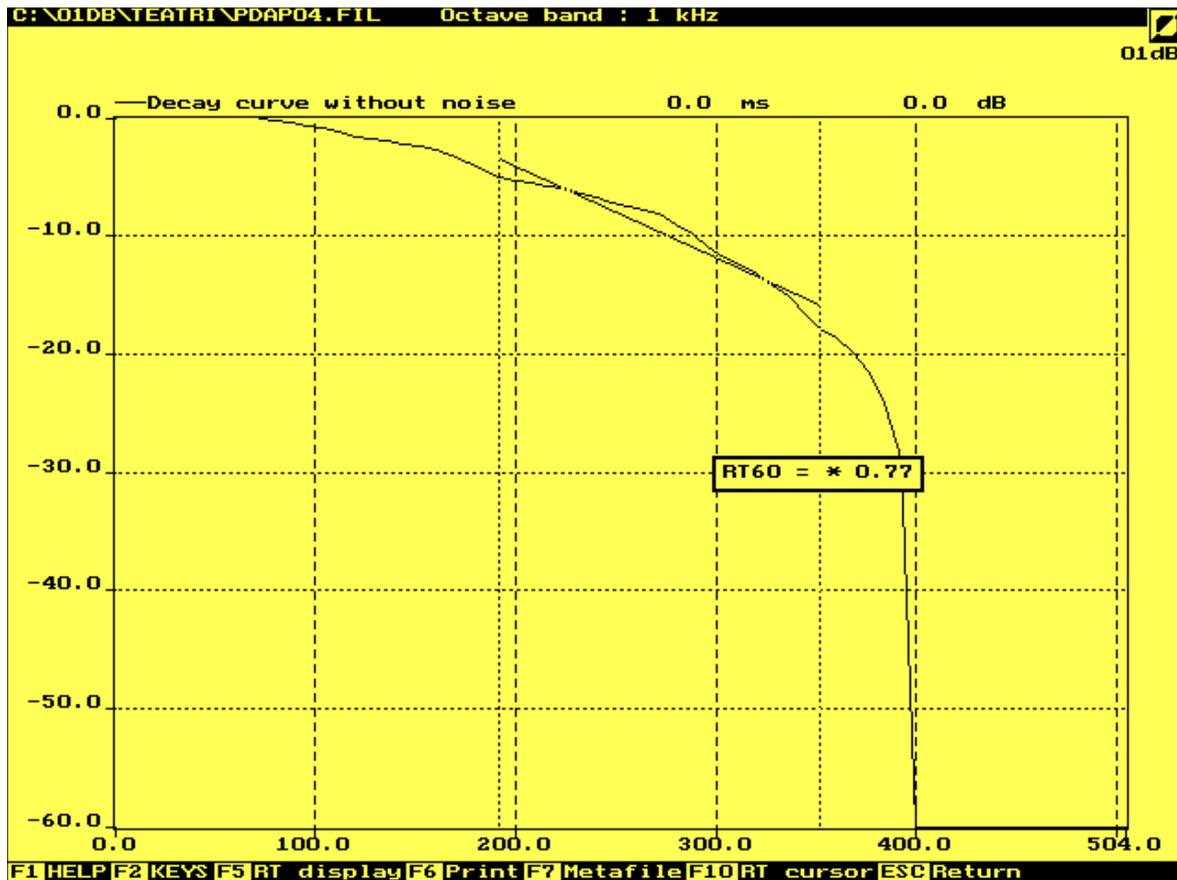


Figura 218: Esempio di calcolo sperimentale del Tempo di Riverberazione

Il calcolo manuale può lasciare all'operatore la responsabilità della scelta del tratto di interpolazione lineare. Nella figura si ha un esempio pratico e il risultato porta ad avere  $RT=1.12$  s ben diverso dal risultato precedente.

In realtà occorre sempre tenere presente che un decadimento non lineare è sempre dovuto a cause specifiche che occorre individuare e valutare.

Si pensi, ad esempio, a sale musicali con volumi accoppiati o con problemi di accumulo energetico o qualunque altra causa che porti ad un decadimento non esponenziale e, di conseguenza, ad un diagramma logaritmico non lineare.

Per il caso di curva di decadimento non lineare si osservi la seguente illustrazione nella quale il calcolo di RT è stato effettuato manualmente nel secondo tratto della curva.

Occorre dunque porre molta attenzione al calcolo di RT qualunque sia il metodo utilizzato. Nel caso qui rappresentato la curva di decadimento presenta **due andamenti** distinti.

In questo caso appare evidente un primo contributo, dovuto al decadimento in un volume della sala (ad esempio la fossa orchestrale), seguito da un secondo contributo dovuto ad un secondo volume.

Va qui osservato che per il calcolo di RT la ISO 3382/75 indica l'esclusione, nel calcolo della pendenza della curva di decadimento, dei primi 5 dB e pertanto tutti i programmi automatici effettuano il calcolo della pendenza dopo questo valore limite.

Si osservi che l'esclusione dei primi 5 ms ha una motivazione solo operativa dovuta alla registrazione della curva di decadimento. Nella realtà proprio i primi 5 ms forniscono utilissime informazioni sulle onde riflesse immediate e sulla qualità dell'ascolto.

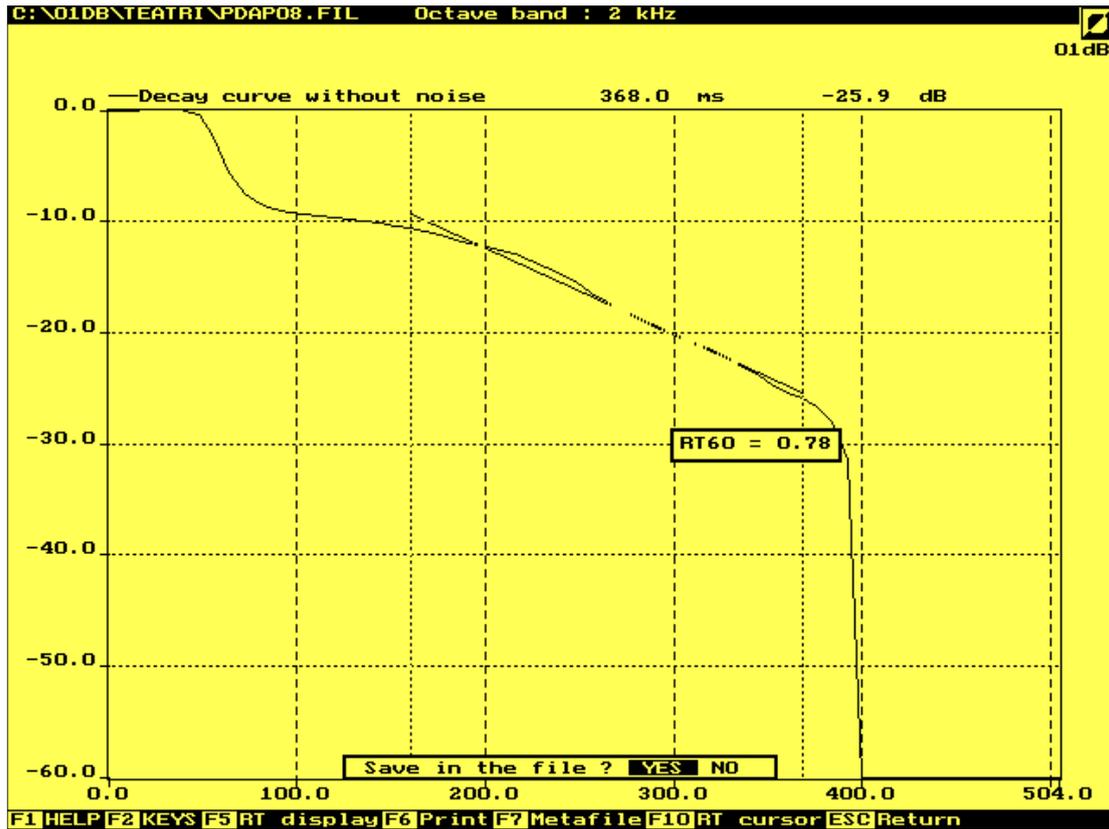


Figura 219: Tempo di riverberazione con volumi accoppiati

### 13.12. I DESCRITTORI ACUSTICI PRINCIPALI

Nella seguente tabella sono riassunti i descrittori acustici principali:

Descrittori Acustici Oggettivi	Simboli, unità	Definizione o espressione matematica	Proposto da	Attributi soggettivi in letteratura
Tempo di Riverberazione	<b>RT60 (s)</b>	Slope of best fit straight line to sound level decay curve from -5 to -25 dB or -30 or -35 dB, extrapolated to -60 dB	Sabine 1923	Reverberance - Liveness
Early Decay Time	<b>EDT (s)</b>	Slope of best fit straight line to sound level decay curve from 0 to -10 dB, extrapolated to -60 dB	Jordan 1975	Reverberance or Liveness
Chiarezza	<b>C-80 (dB)</b>	$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt}$	Reichardt 1975	Music clarity and blend
Definizione	<b>D-50 (%)</b>	$D = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$	Thiele 1953	Speech intelligibility & Sound Definition
Rapporto Segnale/Rumore	<b>S/N (dB)</b>	$S/N = 10 \log \frac{\int_0^{95ms} \alpha(t) p^2(t) dt}{\int_{95ms}^{\infty} p^2(t) dt}$	Lochner & Burger 1964	Speech Intelligibility
Rapid Speech Transmission Index	<b>RASTI (ratio)</b>	$RASTI = [(S/N)_{media} + 15] / 30$	Steeneken & Houtgast 1980	Speech Intelligibility

Tabella 43: Definizione dei descrittori acustici oggettivi utilizzati nelle comparazioni

### 13.13. EARLY DECAY TIME (EDT)

È la misura della rapidità di caduta dei primi 10 dB del segnale acustico e viene espresso in secondi come il tempo di riverberazione. Per una sala musicale altamente diffondente, dove il decadimento del livello sonoro è lineare, *EDT* e *RT* (acronimo di *reverberation time*) sono solitamente eguali. Qualora la sala ha irregolarità diffusive (volumi accoppiati, accumuli energetici, riflessioni ritardate, ...) allora *EDT* e *RT* hanno spesso valori che possono essere molto diversi.

L'*Early Decay Time (EDT)*, proposto da V.L. Jordan, è secondo Schröder e Sessler (1965) meglio correlato al giudizio soggettivo di ascolto del più tradizionale *RT* perché l'*EDT* prende meglio in considerazione l'influenza delle prime riflessioni che sono più vicine alla risposta soggettiva di spazialità degli spettatori. In realtà numerose indagini recenti (T. Nishi, V.L. Jordan, S. Wu) hanno dimostrato un'elevata correlazione mutua fra *EDT* e *RT* tanto da ritenere indifferente la scelta dell'uno o dell'altro nella correlazione con i criteri soggettivi.

Si è anche osservato che l'*EDT* varia molto più di quanto non faccia *RT* in funzione del posto occupato nella sala musicale e pertanto è necessario esprimerne il valore medio su più punti di misura.

L'*EDT* sembra meglio correlare i passaggi musicali rapidi e articolati allorché si percepisce solamente la parte iniziale del decadimento dei picchi della pressione sonora più intensi mentre la rimanente parte è mascherata da eventi successivi, solitamente arrivi di onde riflesse ritardate.

Il campo di valori ottimali suggerito in letteratura per musica sinfonica per questi due criteri, *EDT* ed *RT*, è (vedi V.L. Jordan):

$$1,8 < EDT < 2,8 \text{ s}$$

$$1,4 < RT < 2,8 \text{ s}$$

Di solito entrambi gli indici *EDT* e *RT* sono misurati a varie frequenze (analisi per ottave o per terzi di ottave). In passato si consigliava un aumento del tempo di riverberazione alle basse frequenze ed una modesta riduzione alle alte. Oggi, però, si tende a preferire un andamento pressoché costante

### 13.14. CHIAREZZA O (C80) EARLY-TO-LATE SOUND INDEX

Questo indice, proposto da Reichardt, correla il bilancio fra chiarezza percepita e il tempo di riverberazione ed è molto indicativo per l'ascolto della musica con passaggi delicati.

La sua definizione matematica è la seguente:

$$C80 = 10 \text{Log} \frac{\int_0^{80\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{80\text{ms}}^{\infty\text{ms}} p^2(t) dt} \quad (\text{dB}) \quad [116]$$

ove il termine  $p^2(t)$  è proporzionale all'energia istantanea e quindi la precedente relazione rappresenta, in decibel, il rapporto fra l'energia ricevuta nei primi 80 ms (*early energy*) e l'energia ricevuta negli istanti successivi (*late energy*). Si parlerà diffusamente nel prosieguo delle differenze fra queste forme energetiche e della loro importanza nella qualità dell'ascolto.

L'energia nei primi 80 ms comprende quella diretta e quella di riflessione immediata (*early reflections*) e quindi *C80* fornisce un indice direttamente correlato alla comprensione del linguaggio parlato o alla comprensione dei passaggi musicali delicati, laddove è necessario percepire legami rapidi e meno intensi rispetto a note lunghe e più intense.

I valori ottimali suggeriti in letteratura sono definiti dal seguente intervalli:

$$-2 < C80 < 2 \text{ dB}$$

Questa relazione ci dice che esiste un campo ottimale dell'indice di chiarezza; in pratica una chiarezza eccessiva o insufficiente sono indesiderate nell'ascolto musicale perché viene meno il legame fra le note e quindi l'armonia complessiva oppure si perde di definizione e quindi di riconoscibilità del suono.

Alcuni valori misurati di C80 sono i seguenti:

Sala Musicale	Valore minore	Valore medio	Valore maggiore
Gross Musikhalle (Wien)	-5.30	-2.90	-0.30
Salle Pleyel (Paris)	-3.37	-0.70	4.37
Auditorium M. Ravel (Lyon)	-3.07	-0.13	2.88

Tabella 44: Alcuni valori di C80 di sale musicali reali

In generale valori centrati intorno 0 dB sono preferibili per la musica sinfonica. I limiti di variazione consigliati per la musica sono:

$$-2 < C80 < 2 \text{ dB}$$

Per i teatri lirici (vedi capitoli seguenti) si consigliano valori compresi nell'intervallo:

$$1 < C80 < 4 \text{ dB}$$

Si osservi che C80 è negativo allorché l'energia dopo gli 80 ms supera l'energia compresa nei primi 80 ms. Esso è positivo nel caso opposto.

### 13.15. INDICE DI DEFINIZIONE (D) E DI EFFICIENZA LATERALE (LE)

Questo indice è alquanto simile alla chiarezza ed è stato introdotto da Thiele con la seguente definizione:

$$D = \frac{\int_0^{50\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad [117]$$

Esso è il rapporto fra l'energia totale nei primi 50 ms e l'energia totale ricevuta.

Diversamente da C80 viene imposto un intervallo di tempo ancora più ristretto per considerare solamente l'effetto delle riflessioni laterali immediate (*early reflections*).

Il limite di tempo di 50 ms appare più indicato per il linguaggio parlato mentre un limite di 80 ms è indicato maggiormente per un linguaggio

L'Efficienza Laterale, proposta da Marshall (1981), si riferisce all'impressione di spazialità ed è definito dalla relazione:

$$LE = \frac{\left[ \int_{25\text{ms}}^{80\text{ms}} P_{\text{mic.8}}^2(t) \cos^2 \theta dt \right]_{\text{Laterale}}}{\left[ \int_{0\text{ms}}^{80\text{ms}} P^2(t) dt \right]_{\text{Diretta}}} \quad [118]$$

La frazione di energia a numeratore è misurata con un microfono a figura di otto (da cui il pedice mic.8 indicato nelle relazione precedente) posto perpendicolare alla direzione del suono diretto. LE può essere calcolata anche dalla risposta impulsiva della sala e la precedente definizione può essere riscritta nella forma:

$$LE = \frac{\left[ \int_{25ms}^{80ms} h_{mic.8}^2(t) \cos^2 \theta dt \right]_{Laterale}}{\left[ \int_{0ms}^{80ms} h^2(t) dt \right]_{Diretta}} \quad [119]$$

con  $h(t)$  risposta impulsiva della sala. L'angolo  $\theta$  è relativo alla direzione del suono incidente con la direzione di massima intensità (cioè verso le pareti laterali).

Un metodo di calcolare LE per sale uniformemente diffondenti è stato proposto da V.L. Jordan che suggerisce che debba essere

$$LE > 0.20 \div 3$$

Ricerche recenti hanno dimostrato che l'effetto spaziale è anche influenzato dal livello sonoro della musica: i livelli più elevati rafforzano la sensazione di spazialità che non i livelli più bassi (vedi Y. Ando, op. citata).

### 13.16. IL RAPPORTO S/N DI LOCHNER E BURGER

Sulla base di alcuni esperimenti effettuati in campi sonori simulati *Lochner* e *Burger* (1961) hanno introdotto un fattore di pesatura  $\alpha(t)$  per l'energia riflessa immediata.

Essi considerano che l'energia utile sia quella che arriva entro 95 ms e il suo contributo all'intelligibilità si ottiene moltiplicando tale energia per un *fattore di pesatura* che è funzione del suo ritardo, come indicato in figura 43.

Il fattore di pesatura  $\alpha(t)$  può, in prima approssimazione, essere definito come:

$$\begin{aligned} \alpha(t) &= 1 & 0 \leq t \leq 35 \text{ ms} \\ \alpha(t) &= -1/60(t-95) & 35 \leq t \leq 95 \text{ ms} \\ \alpha(t) &= 0 & t \geq 95 \text{ ms} \end{aligned}$$

L'energia oltre i 95 ms è ritenuta dannosa per l'intelligibilità delle parole. Il *rapporto di Lochner e Burger* detto anche *rapporto segnale/rumore* è dato dal rapporto fra l'energia utile e quella dannosa, espresso in dB.

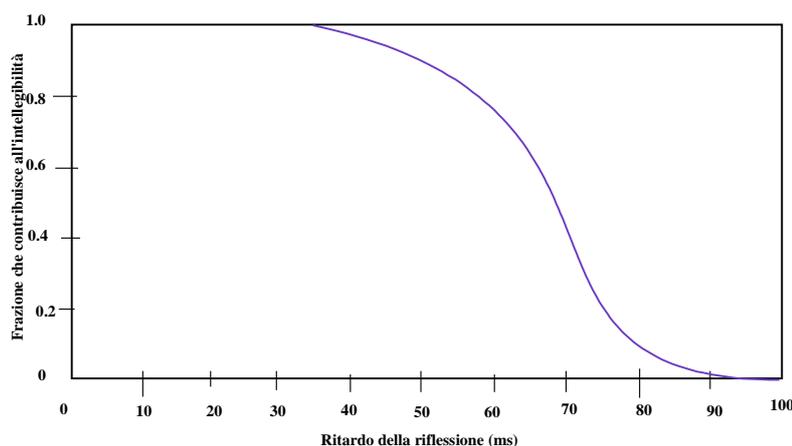


Figura 220: Fattore  $\alpha(t)$  di Lochner e Burger

La sua formulazione analitica è la seguente:

$$S/N = 10 \text{Log} \frac{\int_0^{95ms} \alpha(t) p^2(t) dt}{\int_{95ms}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (dB) \quad [120]$$

che può anche essere scritta in funzione della risposta impulsiva della sala nella seguente forma:

$$S/N = 10 \text{Log} \frac{\int_0^{95\text{ms}} \alpha(t) h^2(t) dt}{\int_{95\text{ms}}^{\infty} h^2(t) dt} \quad [121]$$

Cremer e Muller (1969) hanno proposto il *tempo baricentrico*<sup>125)</sup> per evitare il limite netto nelle precedenti definizioni. Con riferimento alla risposta impulsiva si può scrivere:

$$T_c = \frac{\int_0^{\infty} t h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \quad [122]$$

Entrambi i parametri sono meglio correlati all'intelligibilità del parlato della *frazione di energia laterale immediata* benché i coefficienti di correlazioni siano per tutti i parametri superiori a 0.92.

Idealmente una misura dell'intelligibilità combina sia il rapporto segnale-rumore che la risposta impulsiva. Di recente sono stati proposti due indici che meritano di essere esaminati.

*Indice di Bradley,  $U_{50}$*

Bradley (1986) ha analizzato il *rapporto energia utile su energia non utile* includendo l'effetto del rumore di fondo. La sua proposta appare particolarmente semplice ed analiticamente è data dalla relazione:

$$U_{50} = 10 \text{Log} \left( \frac{D}{1 - D - N/S} \right) \quad [123]$$

ove  $U_{50}$  è l'*indice utile/non utile*,  $D$  è la frazione di energia riflessa immediata,  $N/S$  è il rapporto segnale-rumore<sup>126)</sup> in termini energetici. Il pedice 50 di  $U$  si riferisce al limite di 50 ms per l'energia riflessa immediata. Bradley ha trovato buona correlazione con l'intelligibilità anche con il tempo limite di 80 ms, cioè con una definizione di  $U_{80}$ .

### 13.17. STABILITÀ E AFFIDABILITÀ DEI DESCRITTORI OGGETTIVI

I criteri sopra introdotti si fondano sulla teoria energetica, oggi molto seguita negli studi di *Acustica delle Sale* in tutti i centri di ricerca internazionali.

Appare legittima la domanda se questi criteri siano stabili, con riferimento alle misure acustiche oggi disponibili, nonché se siano ripetibili ed affidabili. Studi recenti hanno dimostrato una buona stabilità del tempo di riverberazione ( $T_{60}$ ) e dell'*Early Decay Time* (EDT) rispetto ai metodi di misura e alla strumentazione utilizzati mentre sono risultati particolarmente delicati gli indici energetici che dipendono da un rapporto di frazioni energetiche quali, ad esempio,  $C_{80}$ ,  $D$ ,  $LE$ .

Nel caso dell'*Efficienza Laterale* ( $LE$ ) il rapporto di energie dipende dalla sensibilità di due diversi tipi di microfoni: uno omnidirezionale ed uno a figura di otto per la misura dell'energia

<sup>25)</sup> Il *tempo baricentrico* è definito anche come *momento del primo ordine* (o *centro di gravità*) del quadrato della risposta impulsiva  $h(t)$ .

<sup>26)</sup> Si osservi che il *rapporto segnale/rumore* è di norma espresso in dB, cioè si ha  $10 \text{Log}(s/n)$ .

delle riflessioni laterali e la cui calibrazione risulta molto delicata. Per questi motivi le misure di LE sembrano essere le più suscettibili di errori e le meno riproducibili rispetto agli altri indici esaminati.

*Le grandezze oggettive sopra citate sembrano dipendere molto dalla posizione della sorgente o del microfono di registrazione, dalla sensibilità di quest'ultimo e della direzionalità della sorgente di eccitazione. V.L. Jordan insiste, però, nel proporre l'uso di questi descrittori a patto che vengano prese le necessarie precauzioni nelle misurazioni. Considerando il numero elevato e l'apparente complessità dei descrittori oggettivi energetici si può pensare di invidiare la semplicità del tempo di riverberazione di Sabine e della sua teoria e cominciare a chiedersi cosa giustifica lo sviluppo di tanti criteri per caratterizzare l'Acustica delle Sale.*

Lo sviluppo degli studi in sé indica che la definizione di acustica delle sale dipende da molte grandezze e qualità mutuamente indipendenti.

Il punto fondamentale che ci si pone è sapere quanti fattori occorre conoscere per caratterizzare pienamente il comportamento acustico delle sale musicali e se è possibile correlare questi fattori in modo univoco con criteri oggettivi.

Questi quesiti hanno interessato i vari studiosi negli ultimi trenta anni e in particolar modo si sono attivate le scuole di Dresda, Berlino e Gottinga.

Alcuni risultati ottenuti recentemente sembrano insoddisfacenti mentre altri sembrano più promettenti ai fini della caratterizzazione acustica di una sala musicale e dei criteri da adottare.

### 13.18. SPAZIO OGGETTIVO E SOGGETTIVO DI UNA SALA

Il requisito soggettivo per un suono è di essere intelligibile. Per il linguaggio musicale non è possibile definire un concetto di intelligibilità ma occorre riferirsi al complesso di caratteristiche musicali che rendono il problema del giudizio dell'ascolto musicale di tipo multidimensionale.

Nelle sale musicali ci sono almeno cinque dimensioni acustiche e negli ultimi due decenni si sono ulteriormente raffinati gli studi su queste dimensioni. Appare evidente che:

- *la **chiarezza** (clarity) dovrebbe essere adeguata a percepire dettagli musicali;*
- *la risposta **riverberante** della sala è responsabile della sensazione di spazialità ricevuta;*
- *l'**inviluppo** che fornisce all'ascoltatore la sensazione di essere avvolto dalla musica;*
- *l'**intimità** (intimacy) è responsabile della sensazione acustica globale;*
- *la **loudness** (la forza di ascolto o forza del livello sonoro) è responsabile del giudizio fondamentale di bontà acustica.*

A queste qualità occorrerebbe aggiungere il **colore** o **timbro** che è certamente importante nel giudizio dell'ascolto della musica. Le suddette cinque qualità (**chiarezza**, **riverberazione**, **inviluppo**, **intimità**, **loudness**) forniscono un utile riferimento per la discussione sulla dimensione soggettiva.

Queste qualità soggettive sono di solito rilevate mediante giudizi personali con opportuni questionari e non con misurazioni strumentali e quindi oggettive.

Per illustrare la natura dell'esperienza soggettiva occorre osservare il fenomeno da un altro punto di vista, cioè guardare agli effetti soggettivi associati ad una singola riflessione. Questo può essere considerato come il primo passo nella descrizione della risposta impulsiva che contiene numerose riflessioni acustiche. Una singola riflessione è caratterizzata da:

- **livello sonoro** (loudness);

- ritardo rispetto all'onda diretta;
- direzione di provenienza.

La risposta soggettiva alle riflessioni intense dipende dal ritardo: le riflessioni intense ma molto ritardate sono percepite come eco e provocano disturbo, le riflessioni intense ma poco ritardate rispetto al suono diretto sembrano arrivare da una direzione intermedia fra quella dell'onda diretta e quella della riflessione geometrica vera e propria.



Figura 221: Esempio di una moderna sale sinfonica

Si ha quindi, per le riflessioni ravvicinate (*early*) una sorta di spostamento dell'immagine (spostamento di scena) che appare essere molto ridotto se il ritardo dell'onda riflessa è inferiore a 7 ms mentre per valori attorno a 20 ms il tono della musica diviene più acuto e cupo, in special modo il suono del violino.

Il ritardo dell'onda riflessa è pertanto responsabile di una colorazione tonale soprattutto nelle sale con riflessioni provenienti da grandi superfici piane; quest'effetto è più forte per riflessioni al sopra della testa degli ascoltatori e pertanto è bene evitare schermi riflettenti sospesi orizzontalmente nelle sale da concerto.

L'effetto principale soggettivo delle riflessioni ravvicinate provenienti lateralmente è di creare una sensazione di spazialità: le riflessioni laterali danno l'impressione di un allargamento della scena e di spazialità, cioè fanno sentire l'ascoltatore immerso nella terza dimensione con la sensazione di essere avvolto ed immerso nel suono.

Quest'osservazione è importante per comprendere la presenza delle numerose superfici laterali presenti nei moderni teatri, come indicato nelle numerose foto prima presentate.

### 13.18.1. EFFETTI DELLE ONDE DIRETTE E DELLE RIFLESSIONI

Prendendo come riferimento il suono diretto sia per il livello sonoro che per il ritardo si ha una situazione del tipo di quella indicata in figura (*Barron*). Le riflessioni deboli non sono sentite dall'ascoltatore e pertanto ricadono al di sotto della soglia dell'udito.

L'effetto di spazialità è stato rilevato in modo significativo da *Marshall* (1967) ed oggi è considerato una delle proprietà più importanti delle sale da concerto, incluse anche le classiche sale rettangolari.

E' anche interessante l'effetto fisiologico implicato nella *sensazione di spazialità*: il sistema uditivo risponde favorevolmente alle dissimmetrie rispetto alle due orecchie mediante una correlazione incrociata dei due segnali acustici (*Blauert* 1974, *Schröder* 1970, *Ando* 1985, ...).

E' stato dimostrato attorno al 1950 che per potere capire bene l'acustica delle sale era anche necessario conoscere a fondo il meccanismo dell'udito. Ciò ha portato al primo vero salto di qualità nelle ricerche dopo gli studi di Sabine sul tempo di riverberazione.

Molto lavoro è stato effettuato utilizzando sistemi di simulazione nei quali il campo acustico è creato artificialmente in laboratorio. Nelle prove vengono simulate le riflessioni introducendo un ritardo temporale per i segnali inviati ad una seconda serie di altoparlanti disposti secondo direzioni prestabilite.

La riverberazione può essere simulata in vari modi, ad esempio con un piano riverberante o con un *riverberatore elettronico*. Si è dimostrato che l'orecchio utilizza l'onda diretta per localizzare la sorgente sonora e che le riflessioni laterali vicine (*early*) sono utilizzate per rafforzare il suono ricevuto al fine dell'intelligibilità.

Inoltre la direzionalità della sorgente viene mantenuta anche quando le riflessioni laterali sono più intense del suono diretto. Sebbene gli esperimenti di simulazione siano stati cruciali per la conoscenza della risposta soggettiva essi non sono capaci di rispondere a tutti i quesiti derivanti dal problema dell'ascolto della musica. Beranek nel 1962 iniziò lo studio sistematico di 54 sale musicali e utilizzò i giudizi di direttori di orchestra, musicisti, orchestrali e critici musicali per dare un voto alle sale esaminate.

In questo modo Beranek creò una scala di giudizio per le sale musicali e dimostrò che, pur essendo il tempo di riverberazione importante, il parametro di maggior peso (40% della scala totale di giudizio) era il tempo-di ritardo-iniziale (ITDG) della prima onda riflessa.

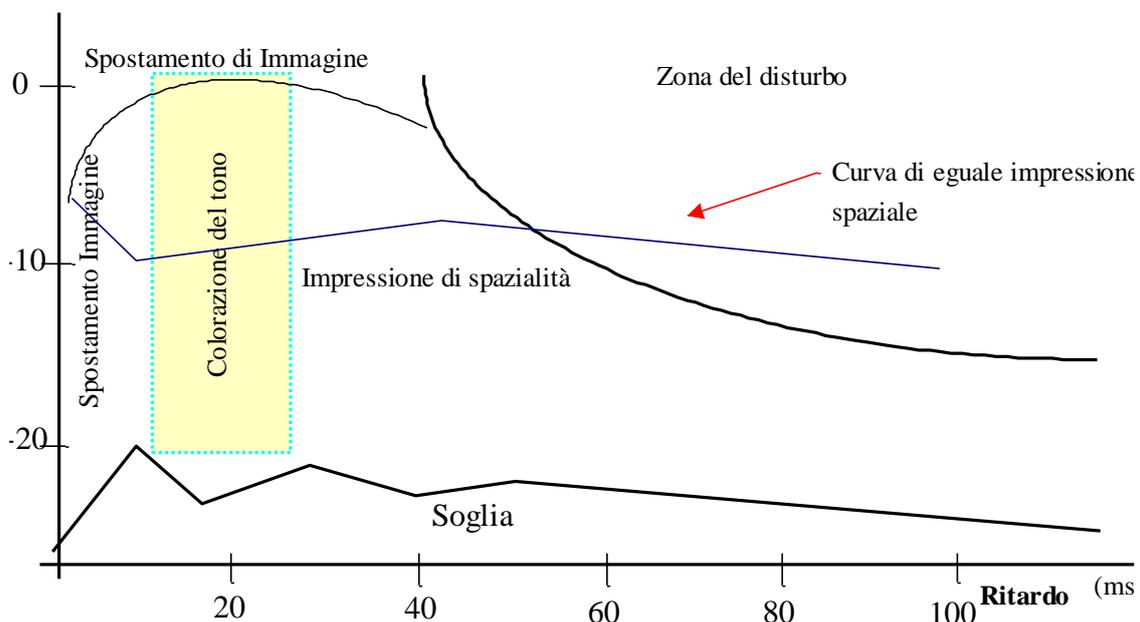


Figura 222: Effetto delle riflessioni

### 13.18.2. INTERPRETAZIONE UDITIVA DELLE RIFLESSIONI

In una grande sala musicale l'ascoltatore riceve circa 8000 riflessioni entro un secondo dal suono diretto in una risposta impulsiva. Ciascuna riflessione è caratterizzata da:

- un livello sonoro;
- un ritardo rispetto al suono diretto;
- una direzione di provenienza.

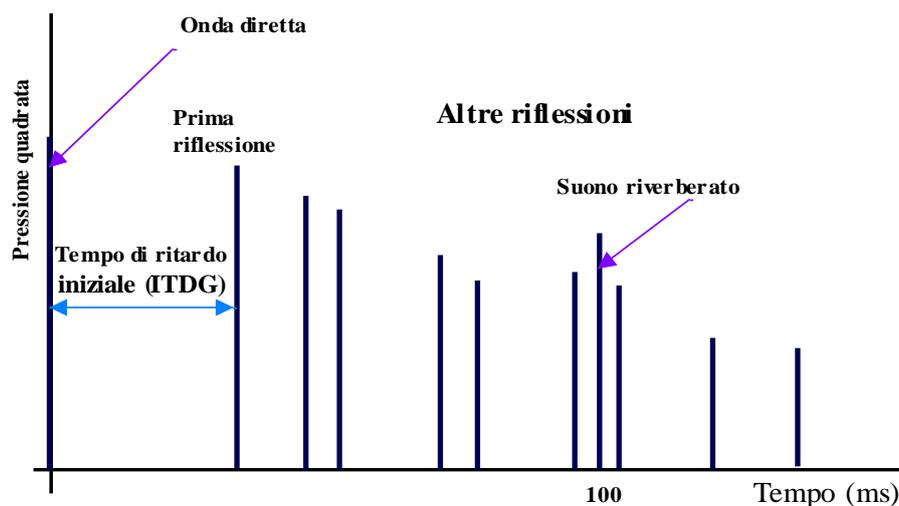


Figura 223: Rappresentazione dell'ITDG

L'orecchio umano è altamente selettivo nell'interpretazione di questi dati. In primo luogo l'orecchio deve stabilire con esattezza (almeno in senso psicologico) la direzione di provenienza del suono.

Per fare ciò esso è in grado di isolare l'onda diretta e localizzare il primo fronte d'onda ricevuto giocando sulle differenze di tempo nella ricezione del segnale nell'orecchio destro e sinistro.

Poiché le dimensioni della testa interagiscono solo con alcune frequenze, i meccanismi di localizzazione della direzione sono diversi a seconda della lunghezza d'onda del suono emesso.

Per la localizzazione laterale del suono viene usata la posizione delle orecchie: per basse frequenze è utilizzata la differenza di tempo nella ricezione dei due segnali mentre per le alte frequenze viene utilizzata la differenza di livello. Per le onde in piani verticali viene utilizzato un meccanismo di distorsione della frequenza del segnale dovuta al padiglione uditivo esterno.

L'onda diretta presenta l'inconveniente di diminuire di intensità con il quadrato della distanza dalla sorgente sonora.

Tuttavia l'orecchio è in grado, al fine dell'intelligibilità e chiarezza musicale, di combinare insieme l'energia dell'onda diretta e delle prime riflessioni laterali. Esiste un tempo limite utile per questa somma di energia che dipende dal meccanismo di ascolto e dal tipo di linguaggio (parlato o musicale).

Valori tipici, per altro già visti nella definizione dei parametri oggettivi data in precedenza, sono i seguenti:

- **50 ms** per linguaggio parlato;

· **80 ms** per linguaggio musicale.

Ciò giustifica la scelta dei limiti di integrazione in **C80** e **D**.

Si osservi che dal punto di vista dell'intelligibilità delle parole le riflessioni successive al tempo limite di 50 ms sono senza dubbio dannose al fine della comprensione delle sillabe ma utili per creare nell'ascoltatore il senso di un suono spaziale.

Per dimostrare l'importanza del meccanismo di somma dell'energia diretta e delle prime riflessioni laterali basta citare qualche cifra: in una grande sala musicale il suono diretto scende di 12 dB passando dai 10 ai 40 m dalla sorgente mentre l'energia delle onde riflesse vicine entro 80 ms diminuisce tipicamente di 5 dB.

### 13.18.3. COMBINAZIONE DEI CAMPI DIRETTI E DIFFUSI

Nella figura é riportato un esempio di combinazione dei campi diretti e diffusi al variare della distanza dalla sorgente. E' ben visibile l'effetto di rinforzo delle onde riflesse soprattutto a distanze grandi (> 5 metri) dalla sorgente.

Del resto gli esperimenti di Lyon hanno dimostrato che nelle migliori condizioni possibili la distanza massima di udibilità del suono diretto all'aperto é di 32 m.

Come si può osservare dalla figura il livello totale decresce sensibilmente oltre i 15-20 m dalla sorgente sonora. Questo significa che occorre recuperare onde riflesse nei punti più lontani in modo da innalzare il livello totale.

L'utilizzo delle superfici riflettenti e di schermi opportunamente posizionati consente di indirizzare i *raggi sonori* verso le zone meno coperte. Sorge anche il problema della *colorazione* degli schermi acustici. Questi, infatti, riflettono maggiormente le onde di lunghezza d'onda comparabile con le proprie dimensioni e pertanto si arrischino le frequenze basse (sotto i 300-400 Hz) a scapito delle frequenze alte. Pertanto occorre utilizzare gli schermi con molta attenzione.

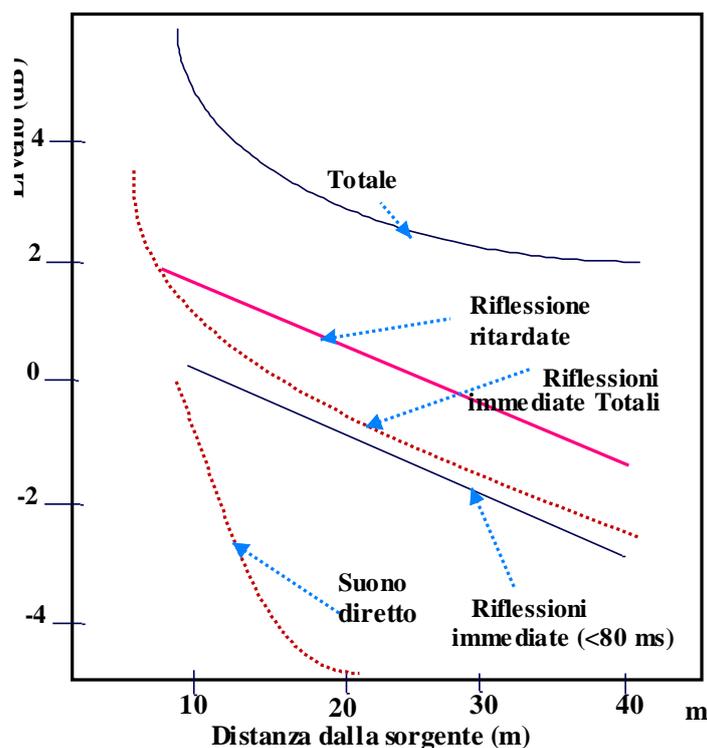
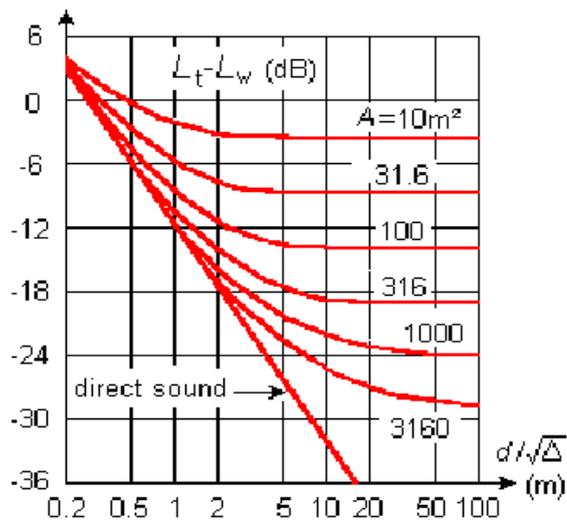


Figura 224: Combinazione dei campi diretti e diffusi



" $d$ " distance from the source.  
 " $\Delta$ " directivity factor  
 " $L_t$ " global sound pressure level.  
 " $L_w$ " source sound power level.

$$L_p = L_w + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi d^2} + \frac{4}{R} \right) \quad \text{con}$$

$$L_w = 10 \log \frac{W}{10^{-12}}, \quad W \text{ in Watt}$$

$$R = \frac{\sum S_i a_i}{1 - a_m}; \quad a_m = \frac{\sum a_i S_i}{\sum S_i}$$

Figura 225: Effetti combinati delle onde dirette e riflesse in un ambiente chiuso

#### 13.18.4. EFFETTI DEL RIVERBERO SULL'INTELLEGGIBILITÀ

Il suono ricevuto dall'ascoltatore può essere suddiviso in tre componenti:

- - **il suono diretto**
- - **le riflessioni immediate**
- - **le riflessioni ritardate (e riverberate).**

Le tecniche di progettazione di un auditorium influenzano spesso solo una delle tre componenti sonore piuttosto che tutte e tre.

Ci sono parecchi aspetti della risposta impulsiva che l'orecchio percepisce: il tempo di riverberazione è uno di questi. Le ragioni della sua importanza sono illustrate nella figura seguente. La natura temporale della musica e del linguaggio parlato è descrivibile in una serie di successione di impulsi.

Nella Figura 226 il tempo di accumulo è piccolo rispetto a quello di decadimento e quindi non è rappresentato.

La riverberazione produce un livello di fondo per il decadimento dei livelli delle parole o note musicali.

Nella figura **a** il tempo di riverberazione è piccolo e pertanto i singoli fenomeni acustici sono percepiti singolarmente; nella figura **b** il tempo di riverberazione è grande e quindi si ha il fenomeno di mascheramento di alcuni eventi acustici rispetto agli altri.

In generale esiste un tempo di riverberazione ottimo che viene determinato in funzione dell'utilizzo della sala e che grossolanamente può essere indicato (a 1000 Hz) pari a 2 secondi per musica sinfonica, 1,5 secondi per la lirica e 1 secondo per linguaggio parlato.

Il giudizio soggettivo dell'acustica di una sala, però, dipende da molti altri fattori e non solo dal tempo di riverberazione.

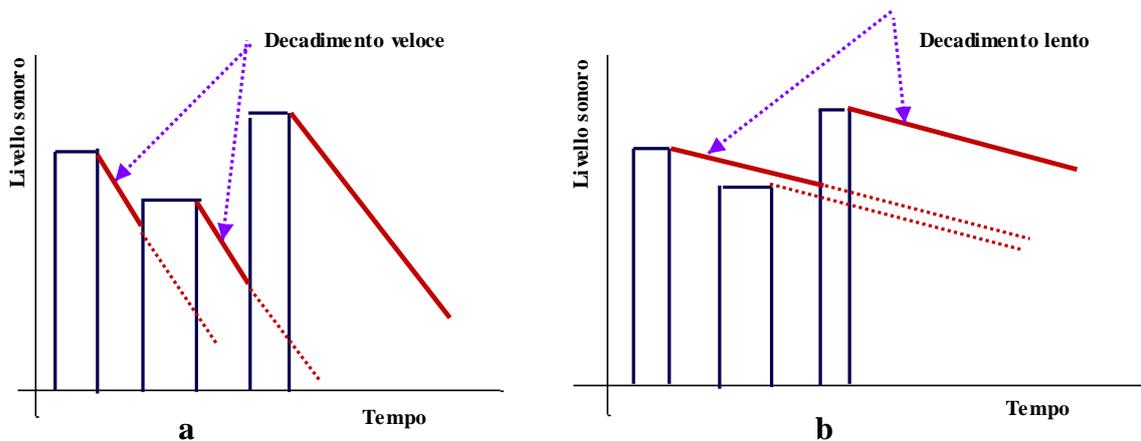


Figura 226: Effetti del riverbero sull'intelligibilità

### 13.19. PRESENTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE OGGETTIVE

Per alcune grandezze è possibile pensare di accettare un valore medio delle misure effettuate ma per altre i valori medi possono anche perdere di significato per l'ascolto.

Solitamente le misure sono effettuate ponendo la sorgente in un solo punto e spostando il punto di misura in un numero opportuno di posizioni nella sala. Solitamente sono rappresentati i seguenti parametri:

- **tempo di riverberazione,  $RT$  (s) per sala vuota e sala occupata;**
- **Early Decay Time, EDT (s) per Sala vuota;**
- **la chiarezza, C80;**
- **l'inviluppo, LE;**
- **il livello sonoro totale a media frequenza, sia misurato che calcolato.**

L'interpretazione del tempo di riverberazione può essere fatta secondo gli schemi classici e non presenta alcuna difficoltà.

L'EDT è misurato con sala vuota alle stesse frequenze del tempo di riverberazione: di solito si ottengono valori inferiori a quest'ultimo, soprattutto sotto la galleria.

Se si desidera comparare RT e EDT è bene non porsi in questi punti di misura. Solitamente l'accordo o il disaccordo fra RT e EDT fornisce indicazioni sulla diffusione del campo acustico o della sua direzionalità e quindi fornisce indicazioni sulla bontà del progetto della sala.

In sale che generano campi acustici molto diffusi l'accordo fra i due parametri è solitamente molto buono.

Per la chiarezza (o anche *Early-to-late sound index*) nonché per il livello sonoro totale si usano le frequenze medie di 500, 1000 e 2000 Hz centro ottava.

Di solito la chiarezza e il livello totale debbono essere corretti per i valori ottenuti a sala vuota per tenere conto del cambiamento del tempo di riverberazione a sala piena.

Una misura significativa della bontà acustica di una sala è data anche dall'inviluppo (frazione dell'energia laterale immediata) misurato mediante due microfoni: uno omnidirezionale ed uno

avente una curva di direzionalità a forma di otto con asse maggiore posto lateralmente, verso le pareti e la direzione di sensibilità nulla verso la sorgente sonora.

In figura è dato esempio di una presentazione tipica dei risultati ottenute dalle misure all'interno di una sala musicale (Barron 1993).

In essa è anche indicato il valore teorico della chiarezza: gli scostamenti fra i valori medi misurati e quelli teorici possono dipendere dal progetto della sala

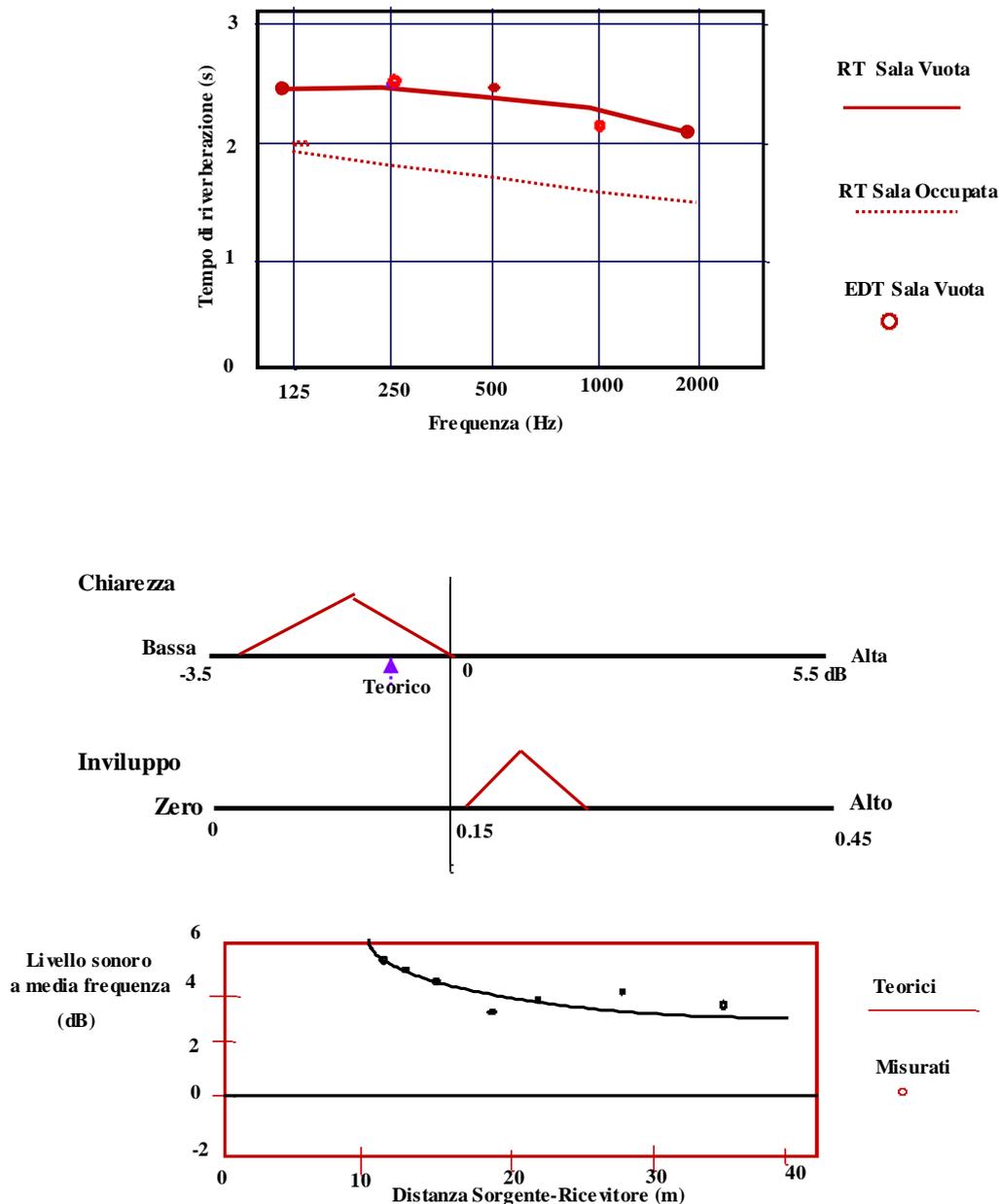


Figura 227: Scheda riepilogativa dei descrittori oggettivi di una sala

## 13.20. GLI SPAZI SOGGETTIVI

Un metodo di presentare i criteri oggettivi mediante fattori soggettivi è quello dell'Analisi Multivariata (Douglas J. Carroll).

Il numero dei parametri ritenuti fondamentali e sufficientemente indipendenti può essere determinato mediante l'analisi dei fattori. Si tratta, in breve, di determinare per prima il numero e

la significatività di scale di giudizio soggettive legate a particolari esperienze e poi trovare i parametri fisici oggettivi che mostrano la correlazione maggiore con le suddette scale di giudizio.

La prima fase può essere attuata presentando brani musicali registrati in diversi siti a diversi soggetti che debbono esprimere un giudizio sia mediante una scala di valori prefissata o mediante un giudizio relativo di preferenza fra due possibili soluzioni. Il risultato di quest'analisi è il numero  $r$  di scale percettive indipendenti, dette fattori, e la significatività di ciascuno dei suddetti fattori. Il significato di questi fattori o scale è essenzialmente sconosciuto ma talvolta questo può essere vagamente circoscritto da etichette verbali quali, ad esempio, risonanza o prossimità.

Questi fattori possono essere raffigurati come assi coordinati di uno spazio ad  $r$  dimensioni nel quale ciascun campo sonoro è rappresentato da un punto. Se  $r=2$  lo spazio percettivo coincide con un piano con assi rettangolari di nome  $F1$  ed  $F2$ . Se l'analisi dei fattori si è basata su test di preferenza allora la scala individuale di preferenza di un soggetto può essere rappresentata da un vettore nel piano ( $F1, F2$ ), come indicato nella figura seguente.  $F1$  può immaginarsi come fattore di consenso mentre  $F2$  riflette le differenze di preferenza degli ascoltatori.

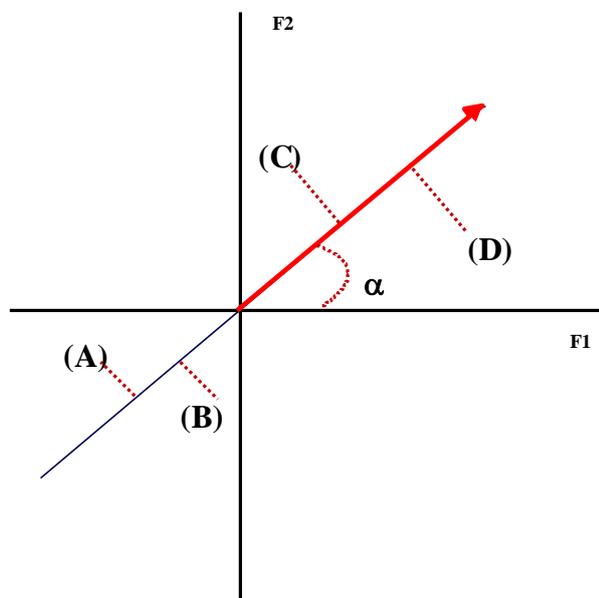


Figura 228: Vettori delle preferenze

### 13.20.1. CRITERIO DELLE PREFERENZE SOGGETTIVE DI Y. ANDO

Y. Ando (1983) propose una scala soggettiva correlata a quattro parametri oggettivi:

- **il livello totale di ascolto, SPL;**
- **il tempo di ritardo della prima riflessione, IDTG;**
- **il tempo di riverberazione susseguente, Tsub;**
- **la correlazione mutua interaurale, IACC.**

Y. Ando ha condotto le ricerche utilizzando i seguenti campi sonori: suono diretto, due distinte riflessioni e riverberazione generata mediante un set di filtri. La relazione proposta, detta preferenza totale soggettiva é:

$$S_a = \sum_{i=1}^4 a_i |X_i|^{3/2}$$

con:

$$X_1 = 20 \text{Log} \left( \frac{P}{P_0} \right) , \quad X_2 = \text{Log} \left| \frac{\Delta t_1}{\Delta t_{ott}} \right| , \quad X_3 = \text{Log} \left| \frac{T_{sub}}{(T_{sub})_{ott}} \right| , \quad X_4 = IACC$$

ove il pedice *ott* si riferisce al valore maggiormente preferito delle quantità cui si riferisce.

Un tale criterio porterebbe ad avere sale musicali non soltanto egualmente buone dal punto di vista musicale ma anche con eguale acustica.

Naturalmente una soluzione limite come quella sopra indicata può essere discutibile poiché sono proprio le variazioni nelle impressioni musicali che possono apparire tanto gradevoli quanto lo è la diversità delle soluzioni architettoniche adottate.

Purtroppo qualunque sia il criterio di giudizio applicato si è ancora lontani dall'aver risolto il problema di determinare un giudizio efficace ed unico per le sale musicali, anzi si corre sempre il rischio di portare avanti una progettazione che può risultare anche inconsistente e contraddittoria.

### 13.20.2. RELAZIONI FRA PARAMETRI OGGETTIVI E SOGGETTIVI

Il problema della progettazione acustica di una sala musicale risulta piuttosto complesso poiché occorre determinare condizioni accettabili da un punto di vista acustico fra le infinite possibili geometricamente.

Chiariamo questo concetto con alcune osservazioni di tipo sistemistico del problema. Se lo spazio fisico (la sala musicale) che si intende realizzare dipende da N parametri indipendenti allora si hanno  $X^N$  possibili combinazioni delle variabili per prefissate condizioni del campo sonoro.

Se lo spazio acustico ha M dimensioni soggettive si hanno  $Q^M$  possibili combinazioni delle suddette variabili. Di norma N è minore di M essendo quest'ultimo dipendente da un elevato numero di criteri soggettivi.

E' allora possibile immaginare che esista una relazione (anche non univoca in alcuni casi) fra i campi sonori ai dello spazio fisico cui corrispondono insiemi di risposte soggettive  $b_i$ .

Il problema della corretta progettazione di una sala musicale è quello di determinare coppie  $(a_i, b_i)$  congruenti legate da funzioni di dipendenza  $g$  (dipendente da funzioni uditive e da funzioni cerebrali tipiche dell'ascolto) e fra l'insieme di queste soluzioni trovare, se esiste, la soluzione ottimale.

Occorre, cioè fare in modo che lo spazio fisico (prestazioni della sala) sia correlato allo spazio soggettivo (preferenze soggettive).

La scelta dei parametri oggettivi indipendenti appare importante anche alla luce della non assoluta indipendenza di alcuni parametri.

Inoltre la scelta dei parametri deve essere oculata e deve cercare di prendere in considerazione non solo quelli di carattere generale, come ad esempio il tempo di riverberazione, ma anche di carattere locale, come ad esempio la chiarezza o la definizione o la componente laterale o altri parametri fra quanti sono stati già definiti.

### 13.20.3. SPAZIO FISICO E SPAZIO ACUSTICO

Il tempo di riverberazione da solo non è sufficiente a caratterizzare energeticamente una sala musicale, malgrado questo sia stato fatto per molti decenni in mancanza di altre informazioni

sull'argomento. Se consideriamo lo spazio geometrico si hanno già  $X^3$  dimensioni. La distribuzione delle riflessioni laterali (immediate e ritardate) è una funzione della posizione di ciascun punto di ascolto rispetto al punto sorgente e pertanto anche i parametri LE, C80, D, LC, .... dipendono dalla posizione considerata.

Considerare il solo parametro **RT** equivale ad ignorare la variabilità degli altri parametri e quindi delle condizioni di ascolto. Allo stesso modo non tutte le sale che hanno eguale tempo di riverberazione sono equivalenti nel senso che presentano gli stessi campi acustici oggettivi (fisici) e soggettivi (di ascolto).

Si ponga attenzione al fatto che possiamo ottenere lo stesso **RT**, a parità di sala, ponendo superfici assorbenti in una combinazione di modi grandissima e tutte equivalenti per la formula di Sabine. Ad esempio possiamo immaginare di applicare pannelli assorbenti sul soffitto o sulla parete di fondo o sulle pareti laterali ma l'effetto di ogni scelta è ben diverso sull'acustica della sala.

Un soffitto non riflettente o pareti laterali non riflettenti porterebbero ad avere problemi di ascolto nei punti lontani dall'onda diretta, mancanza di riflessioni immediate e quindi qualità soggettiva non accettabile. Sempre il considerare il solo tempo di riverberazione quale parametro oggettivo è riduttivo perché esso non tiene conto, ad esempio, della presenza o meno di schermi riflettenti o della loro corretta o scorretta posizione. L'aver un parametro oggettivo capace di sintetizzare le qualità acustiche di una sala è solo un'ambizione: si avrebbe, infatti, una semplificazione dello studio.

Uno spazio fisico a tre dimensioni geometriche e tre parametri energetici indipendenti porta ad avere un numero  $X^6$  di dimensioni. Se si considerano altrettante variabili soggettive, quindi uno spazio soggettivo di dimensioni  $Q^6$ , il problema matematico diviene praticamente irrisolvibile poiché il numero di combinazioni (soluzioni) da considerare diviene elevatissimo.

In conclusione occorre affrontare la progettazione di una sala musicale con spirito di concretezza e con molta esperienza, utilizzando gli strumenti analitici fin qui esaminati con senso critico e con realismo.

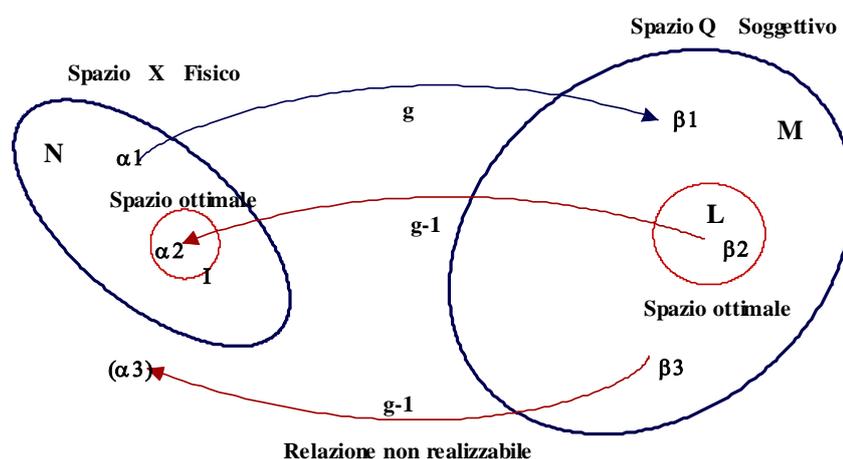


Figura 229: Relazioni fra spazio fisico e spazio acustico

### 13.21. EFFETTI PSICOACUSTICI DELLE RIFLESSIONI IMMEDIATE

Come già più volte detto, le riflessioni immediate (<80 ms) contribuiscono al senso di chiarezza, intimità, loudness e, se queste arrivano dai lati della sala, anche al senso di spazialità della sala.

Tutte queste caratteristiche sono necessarie per la buona acustica delle sale. Con riferimento a semplici considerazioni di acustica geometrica si può cercare di ottenere il risultato desiderato per le riflessioni laterali.

Per una superficie finita occorre avere la condizione che questa sia tangente ad un'ellisse che ha la sorgente e il ricevitore nei suoi fuochi. Un'ellisse definisce anche un certo ritardo di riflessione. Nello spazio, naturalmente, si deve parlare più propriamente di ellissoide. A causa dell'interazione delle onde in funzione della propria lunghezza d'onda, piccole superfici riflettenti sono efficaci solamente per alte frequenze.

Per avere un senso di spazialità e di involuppo del suono parte delle riflessioni debbono provenire dai lati. Anche le riflessioni provenienti da superfici non laterali come il soffitto, le gallerie, superfici oblique, ... sono tutte importanti per avere riflessioni immediate.

Possiamo dire che una riflessione è laterale se vi è una differenza di tempo fra il suo arrivo all'orecchio vicino e quello più lontano: in altre parole occorre che sia presente un ritardo inter-aurale.

Con riferimento alla testa di un ascoltatore rivolto verso la scena sul palco, occorre anche avere un angolo sufficiente fra direzione di provenienza dell'onda riflessa e il piano verticale che biseca la testa dell'ascoltatore (detto anche piano mediano).

Maggiore è l'angolo maggiore è la sensazione di spazialità che l'ascoltatore prova. Questo ha spiegazione con il comportamento dei singoli piani, come raffigurato in figura. Nel caso a della Figura 231 il piano ha inclinazione acuta verso la sorgente ed inoltre l'angolo di arrivo alle orecchie dell'ascoltatore è piccolo, quindi la sensazione di involuppo tende a diminuire. Nel caso b della figura la situazione si inverte e l'angolo di incidenza con il piano mediano aumenta e con esso l'impressione di spazialità.

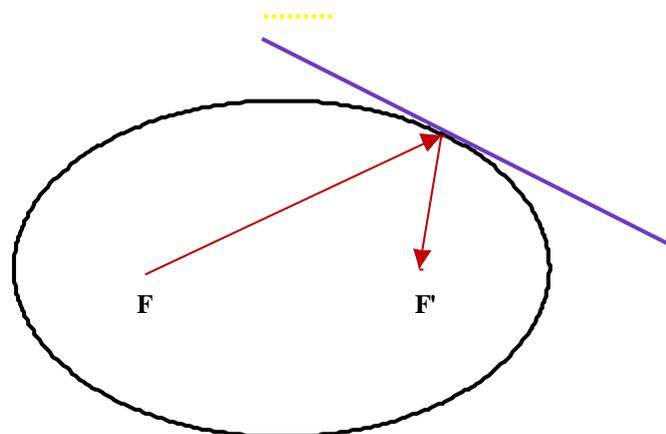


Figura 230: Percorso di un'onda riflessa

Poiché le onde di bassa frequenza sono attenuate al passaggio sulla platea, occorre compensare questo assorbimento con riflessioni laterali, soprattutto nei percorsi lontani dalla sorgente. Il tempo di ritardo della prima riflessione (ITDG) assume una certa importanza per le qualità acustiche della sala e pertanto è opportuno limitarne il valore e in particolare per sale musicali questo limite è di 50 ms.

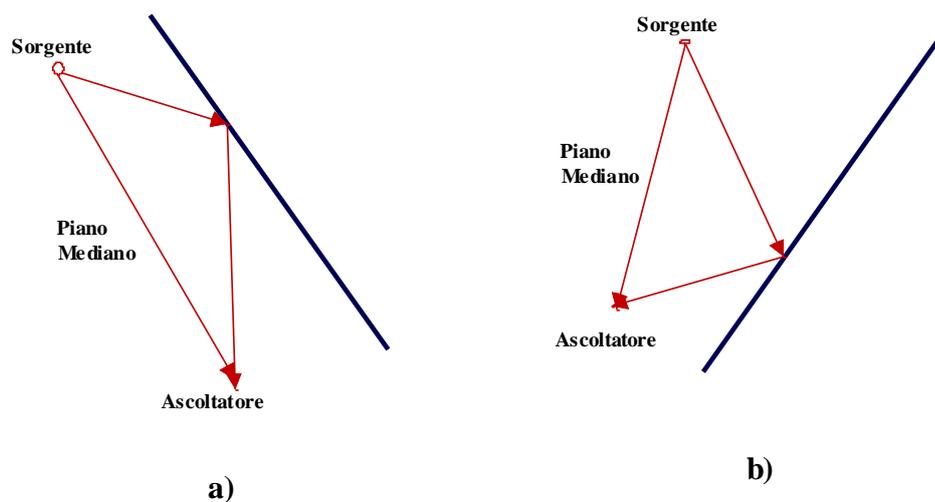


Figura 231: Effetti dell'angolo di inclinazione delle pareti

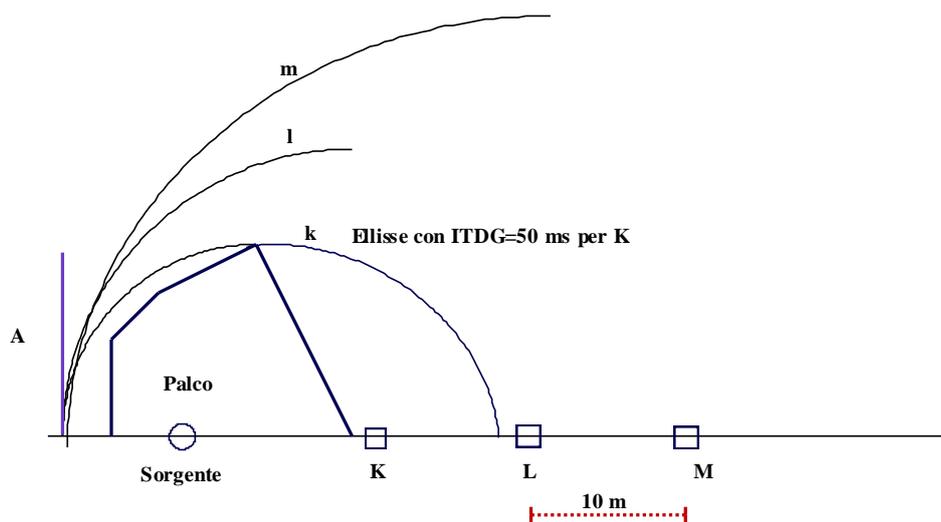


Figura 232: Ellissi di pari ITDG

L'applicazione di questo criterio (ITDG<50ms) porta ad alcune considerazioni progettuali di una certa importanza. Nelle sale dotate di simmetria assiale i posti che risultano più distanti dalle pareti sono le file vicine all'asse centrale. Per compensare questo fatto ed evitare soffitti troppo alti occorre profilare opportunamente la copertura.

Sebbene quest'approccio è fruttuoso per avere una buona loudness, esso presenta due inconvenienti seri: quello di creare una colorazione tonale e un'immagine sorgente vicina. In genere per questi scopi sono preferibili le riflessioni che arrivano lateralmente.

Per sale musicali piccole si possono usare forme in pianta piuttosto semplici. Le forme semplici rettangolari hanno mostrato molti meriti e presentano un notevole interesse. La forma rettangolare genera un notevole numero di onde riflesse ed ha raggiunto un'ottima reputazione come una fra le forme migliori per sale da concerto.

Se si considerano fuochi la posizione della sorgente e dell'ascoltatore K allora una superficie riflettente con tempo di ritardo di 50 ms dovrà essere tangente all'ellisse k di figura.

Si intuisce come all'allontanarsi dell'ascoltatore dalla sorgente tale ellisse va via via crescendo e con esso anche l'altezza della superficie riflettente. Pertanto si dovrebbero avere soffitti sempre più alti. per questo motivo Kremer ha suggerito la soluzione a trapezi di seguito raffigurata.

### 13.22. SOLUZIONI ARCHITETTONICHE

Il progetto della pianta di un teatro lirico origina dal proscenio che ha un'apertura compresa (almeno per i grandi teatri) fra 14 e 18 metri. Larghezze inferiori sono possibili per piccole sale teatrali. L'altezza del proscenio è di norma 9 metri anche se per grandi teatri si hanno altezze maggiori.

Occorre ben disporre la superficie immediatamente vicina al proscenio in modo da orientare le riflessioni provenienti dal palco (ove si trovano i cantanti) verso la sala.

Questa superficie si trova sopra il proscenio e nelle immediate vicinanze della fossa orchestrale (vedi figura) ed occorre inclinarla in modo da avere buone riflessioni verso la sala e al tempo stesso raccorderla bene con le pareti laterali. Esistono, inoltre, altre esigenze che debbono essere valutate con attenzione per ottenere un buon compromesso come, ad esempio, l'esigenza di disporre l'illuminazione di scena sotto la copertura del proscenio. Questi compromessi debbono sempre essere ridotti al massimo.

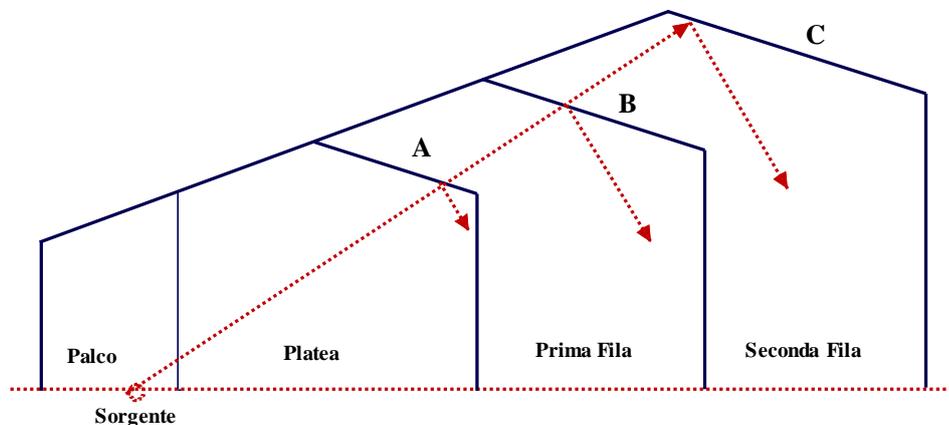


Figura 233: Effetto dell'altezza del soffitto sul percorso delle onde riflesse

Le superfici orizzontali sopra il proscenio sembrano dare i risultati peggiori poiché riflettono sia verso la platea che verso il palco e la fossa orchestrale.

Piccoli elementi di *scattering* (diffrazione) nello schermo del proscenio possono essere utili per riflettere parte dell'energia di alta frequenza dell'orchestra verso le poltrone in platea.

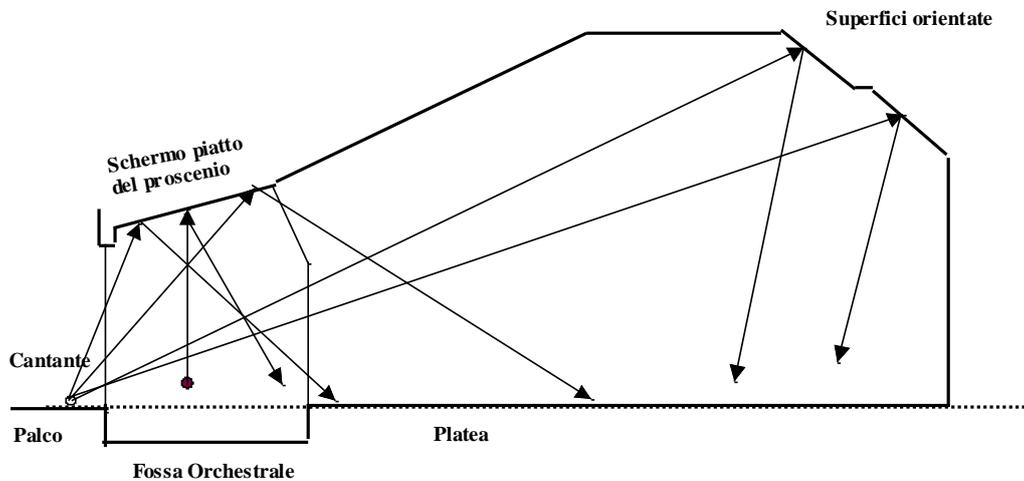


Figura 234: Possibili soluzioni architettoniche

Anche la copertura della sala (posta immediatamente dopo la copertura del proscenio e della fossa orchestrale) è di grande importanza al fine del rinforzo del livello sonoro dell'orchestra e dei cantanti. I principi di progettazione sono in tutto simili a quelli dello specchio sopra il proscenio.

Fasold e Winkler (1976) suggeriscono una serie di superfici orizzontali al di sopra della fossa orchestrale (vedi Figura 235) che provvedono sia alle riflessioni del suono vocale verso la platea del pubblico e di riflettere il suono orchestrale nella stessa fossa.

Nel caso di grandi teatri questi schermi possono provocare, a causa delle altezze di posa, notevoli ritardi. Se tali altezze non possono essere ridotte allora è opportuno rendere tali superfici (nonché il soffitto) acusticamente diffondente. Le riflessioni ritardate provenienti dal soffitto appaiono meno come eco se sono precedute dalle riflessioni della balconata della galleria.

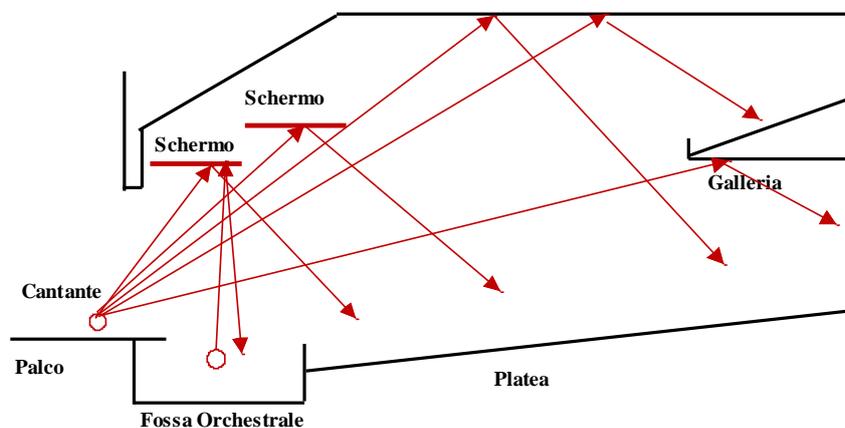


Figura 235: Uso degli schermi correttivi

*Marshall e Meyer* (1985) hanno dimostrato che i cantanti sono più sensibili alla riverberazione che alle riflessioni immediate e queste ultime debbono avere un ritardo massimo di 35 ms per essere utili. Ciò significa che le superfici riflettenti debbono avere una distanza massima di 6 m dai cantanti e spesso vengono utilizzate superfici solide poste nelle loro immediate vicinanze.

Una ricerca piuttosto estesa condotta da *Mackenzie* (1985) su un campione di 5000 frequentatori di sale operistiche mostra come il pubblico ritenga troppo forte il suono dell'orchestra rispetto a quello del cantante.

Una fossa semicoperta si comporta come uno spazio legato alla sala con un tempo di riverberazione a doppio valore, per effetto della variazione del volume: la pendenza iniziale del decadimento è data dalle condizioni locali nella fossa e fornisce valori del tempo di riverberazione di 0.3-0.7 secondi, successivamente il decadimento assume la pendenza tipica dell'auditorio con valori più elevati (si ricordi la curva di decadimento a doppia pendenza per volumi accoppiati).

Le superfici della fossa possono essere ricoperte da materiali assorbenti o diffondenti. Nel primo caso si riduce il livello sonoro ma a spese dell'ensemble fra gli orchestrali.

Con riferimento alla figura si hanno le seguenti proporzioni consigliate:  $V=1-2$  m,  $D=2.5-3.5$  m,  $H=1$  m.

In alcuni teatri la copertura della fossa si può estendere fino a 4-5 m anche se pare consigliabile non superare il limite di 4 m. L'altezza minima non deve essere inferiore a  $D=2$  m per fosse piccole onde garantire un contatto visivo con il direttore d'orchestra.

Oggi si utilizzano piattaforme mobili per garantire una completa flessibilità della fossa orchestrale. L'area della fossa va calcolata in funzione del numero di orchestrali e *Naylor* suggerisce un valore 1,5 m<sup>2</sup> per musicista per le sale operistiche e 1,1 m<sup>2</sup> per le sale sinfoniche. In proporzione la larghezza della fossa non dovrebbe essere superiore a 4 volte la lunghezza (misurata longitudinalmente).

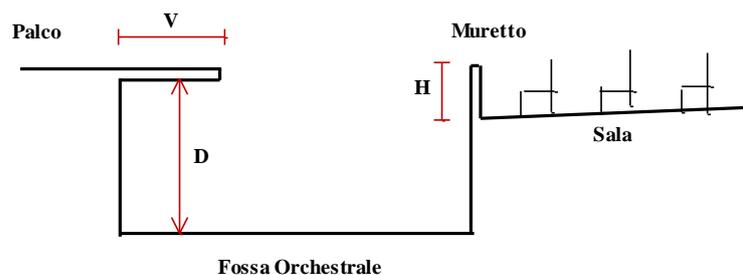


Figura 236: Sistemazione della Fossa Orchestrale

### 13.22.1. REGOLE DI PROGETTAZIONE

Non utilizzare geometrie con elevata simmetria: le forme sferiche, cubiche, ...forniscono risultati peggiori rispetto alle forme con minor grado di simmetria, come già detto in precedenza. Ciò è anche spiegabile considerando che il numero di modi di vibrare per una sala parallelepipedica avente dimensioni  $L_x$ ,  $L_y$ ,  $L_z$  sono proporzionali a:

$$n = \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2}$$

con  $n_x, n_y, n_z$  numeri interi variabili da 0 ad infinito.

Pertanto se la sala è cubica allora si ha  $L_x = L_y = L_z$  e quindi il numero di modi si riduce rispetto alla sala parallelepipedica. Ciò spiega il successo di queste sale avuto nell'ottocento.

Con analogo ragionamento si deve escludere la sala sferica e preferire una sala ellissoidica.

Va osservato, però, che le forme a geometria concava presentano il pericolo della focalizzazione delle riflessioni e pertanto la forma ellissoidica è da evitare perché si avrebbero concentrazioni forti in corrispondenza dei due fuochi.

La funzione di una sala è di distribuire in modo ottimale l'energia sonora emessa dalla sorgente verso i punti di ascolto. Questa distribuzione deve essere fatta con molta attenzione avendo in mente che se si usano superfici assorbenti allora l'intensità sonora diminuisce man mano che le riflessioni progrediscono. Ne segue che un buon principio di progettazione è quello di:

- Limitare al massimo gli assorbimenti dei raggi acustici;
- Fare in modo che la sala, con la sua forma geometrica e in virtù dei materiali utilizzati, guidi le onde acustiche in corrispondenza dell'audience.
- Non usare tetti assorbenti perché si ridurrebbero moltissimo le prime riflessioni verso l'alto e si attenuerebbe molto il LPS nei posti lontani dalle sorgenti.
- Evitare che la parete di fondo sia riflettente perché queste riflessioni possono creare echi e/o problemi di sovrapposizione (nodi e ventri) con le onde dirette. Per non perdere potenza è bene avere la parete di fondo diffondente.
- Occorre sempre avere una parete di scena riflettente o al più diffondente ma non assorbente altrimenti si ridurrebbe l'effetto di rinforzo dell'intensità emessa dalle sorgenti e si avrebbe una attenuazione notevole verso la zona di ascolto.
- Le pareti laterali debbono essere il più possibile riflettenti sia per avere l'effetto psico-acustico delle riflessioni immediate sia perché altrimenti si deprimerebbe il LPS nelle zone centrali della sala. Nel caso si abbiano problemi di riflessioni ritardate oltre i limiti desiderati occorre allora usare superfici diffondenti ma non assorbenti.

Si ricordi che ***il suono assorbito non è più utile per la sala mentre il suono riflesso e/o diffuso contribuisce alla distribuzione del livello sonoro nella sala.***

### 13.23. I CAD ACUSTICI

La progettazione acustica di una sala presenta difficoltà notevoli ed insormontabili se si desidera affrontarli manualmente. Per questo motivo oggi si hanno a disposizione strumenti di calcolo sofisticati, detti CAD Acustici, che consentono di simulare un laboratorio virtuale per la progettazione acustica.

Questi software consentono, partendo da una modellazione solida della sala (evitando l'eccessiva definizione dei particolari che non produrrebbero alcun vantaggio effettivo nei calcoli), di calcolare con varie tecniche i descrittori oggettivi più importanti.

In alcuni casi, calcolando la risposta impulsiva teorica della sala, consentono di effettuare l'**auralizzazione** della sala, cioè consentono di simulare il comportamento acustico della sala in risposta ad una sollecitazione musicale.

Questo risultato è, in pratica, una applicazione del teorema di *Duhamel* e quindi si tratta di effettuare, via software o anche via hardware, la convoluzione fra la risposta impulsiva (calcolata o misurata sperimentalmente) e il brano musicale del quale si vuole studiare la risposta. Il brano musicale è, di norma, inciso in camera anecoica in modo da non apportare altri disturbi o effetti acustici particolari.

Oggi siamo in grado di conoscere anche la risposta impulsiva delle cuffie o degli auricolari e pertanto, con una combinazione in serie di effetti, si può ascoltare in cuffia il risultato della simulazione in un posto della sala senza avere ancora costruito la sala musicale.

Oggi si possono trovare numerosi strumenti di aiuto per la progettazione delle sale. Si tratta di CAD acustici progettati per l'ottimizzazione delle qualità acustiche delle sale.

Questo tipo di strumenti consentono di disegnare la sala da progettare o verificare mediante editor grafici propri o importando i disegni dai CAD commerciali più frequenti.

Solitamente non occorre disegnare la sala in tutti i dettagli ma solo a scala grafica-acustica, cioè rappresentando solo le pareti, strutture e dettagli aventi dimensioni significative per lo studio acustico. In figura è riportato l'esempio di una chiesa in rappresentazione assonometrica all'interno di un CAD acustico commerciale.

### 13.23.1. UTILIZZO DELL'ACUSTICA GEOMETRICA

In figura è riportata la relazione  $c=\lambda f$  per l'intervallo da 20 a 300 Hz. Si osservi come la lunghezza d'onda (espressa in metri) vari da 17 a 0,30 m. A 100 Hz si ha una  $\lambda=3.31$  m.

Ricordiamo che se dimensioni delle pareti sono comparabili con  $\lambda/4$  allora non si può più trascurare il fenomeno della diffrazione che porta ad avere una reirradiazione acustica anche da parte dei bordi della parete.

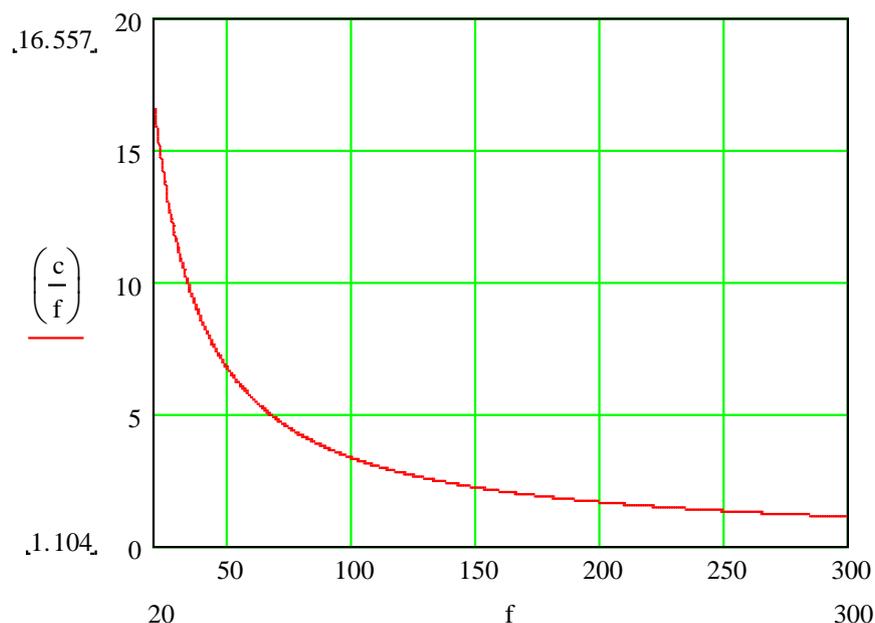


Figura 237: Lunghezza d'onda in funzione della frequenza

Se si guarda bene il diagramma a lato si conclude che già per  $\lambda > 150-200$  Hz si possono considerare le pareti oltre i 2 m come solamente riflettenti.

In queste ipotesi possiamo applicare le regole dell'**Acustica Geometrica** secondo la quale è possibile pensare che un'onda si comporti come un raggio il cui angolo di riflessione è pari all'angolo di incidenza.

In figura si ha anche la costruzione del punto immagine (speculare al punto sorgente) dal quale sembra emanare il raggio riflesso.

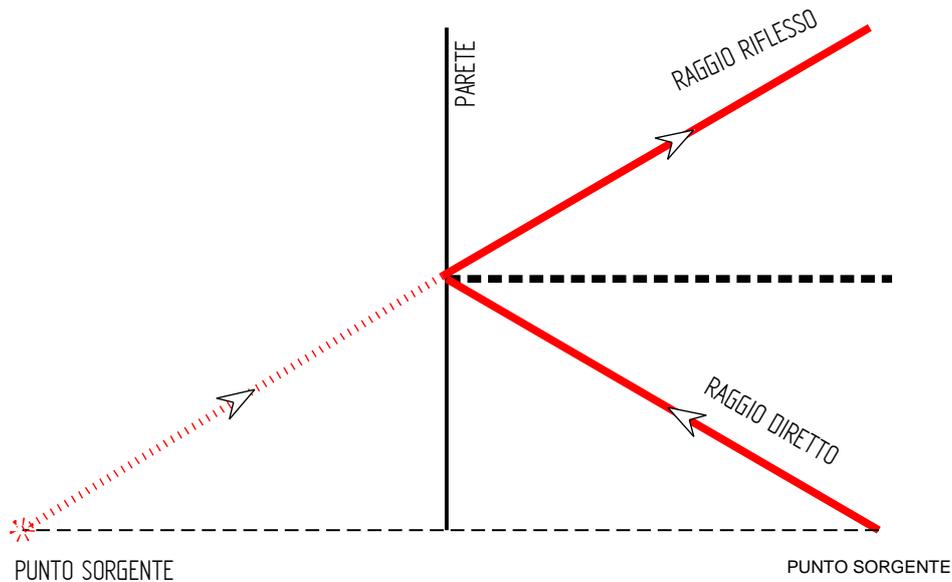


Figura 238: Costruzione del punto immagine

Applicando il metodo dell'*Acustica Geometrica* e in particolare quello delle immagini sorgenti si può definire la regione di spazio occupata dalle immagini sorgenti, come illustrato nelle figure. L'addensamento delle zone e la loro distribuzione indica la qualità delle riflessioni considerate.

Il metodo delle immagini sorgenti si può applicare anche alle riflessioni secondarie oltre che quella primaria. Questo metodo è seguito da CATT Acoustic© per le riflessioni immediate.

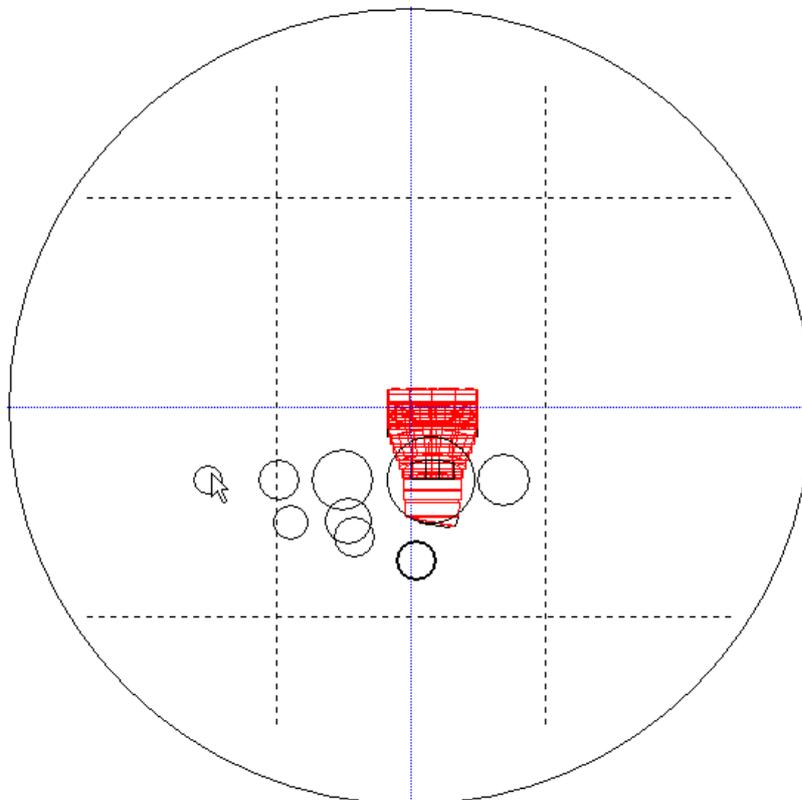


Figura 239: Esempio di posizionamenti delle immagini sorgenti

Nell'ambito di applicazione dell'Acustica Geometrica si possono seguire due metodi fondamentali per il tracciamento dei raggi acustici:

- Metodo delle immagini sorgenti (*Mirror Image Sources Method, MISM*)
- Metodo del tracciamento inverso dei raggi (*Ray Tracing Method, RTM*)

Con il primo metodo si applicano le regole di riflessione acustica descritto in precedenza, determinando i punti immagine, mentre con il secondo metodo si segue il percorso dei raggi riflessi partendo dal punto di arrivo e andando a ritroso verso il punto sorgente.

Questi metodi sono applicati separatamente o, in alcuni casi (vedi CATT Acoustic©) contemporaneamente per diversificare il comportamento acustico specialmente nei primi istanti.

Il vantaggio dei metodi geometrici rispetto a quelli statistici è nella conoscenza della risposta acustica immediata (*early reflections*) nei suoi parametri fondamentali: tempo, intensità, direzione. Questi metodi sono fortemente dipendenti dalla posizione.

Il metodo statistico, per altro, si fonda sull'ipotesi di base della diffusione dei raggi sonori, su un approccio globale al problema dell'acustica della sala e quindi trascurando i problemi locali.

L'analisi statistica perviene a risultati globali (quali il RT60) e quindi indipendenti dalla posizione. Inoltre i metodi statistici sono più semplici da applicare.

### Metodo delle sorgenti immagini e Ray Tracing

In figura seguente (relativa ad una simulazione del teatro Bellini di Catania) si ha il risultato di una simulazione nella quale si possono vedere le riflessioni immediate e quelle ritardate. Le riflessioni immediate sono calcolate con il **metodo delle sorgenti immagini** mentre le riflessioni ritardate sono calcolate con il metodo del **ray tracing**.

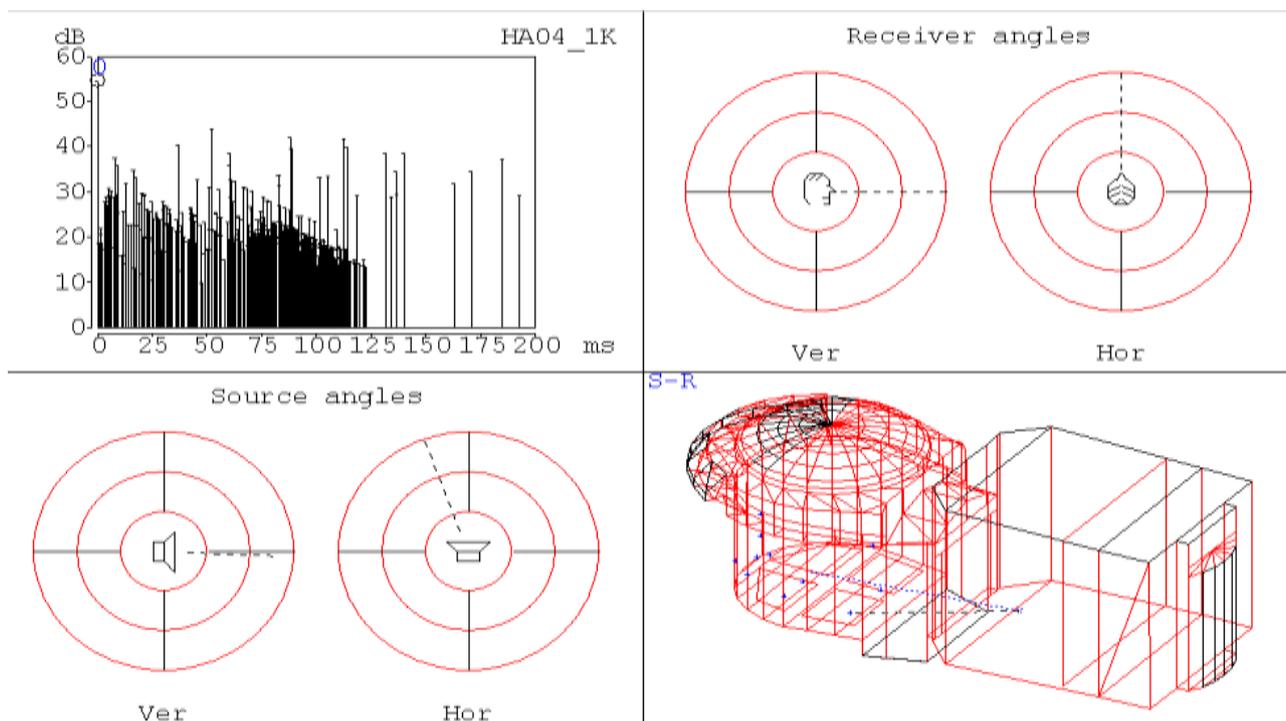


Figura 240: Applicazione del metodo delle sorgenti immagini

In figura seguente si una visualizzazione completa delle zone delle sorgenti immagini nei vari ordini di riflessione. In pratica il metodo MIS consente un tracciamento inverso dei raggi dall'ascoltatore alla sorgente nei primi ms di transitorio o per un numero di riflessioni imposto.

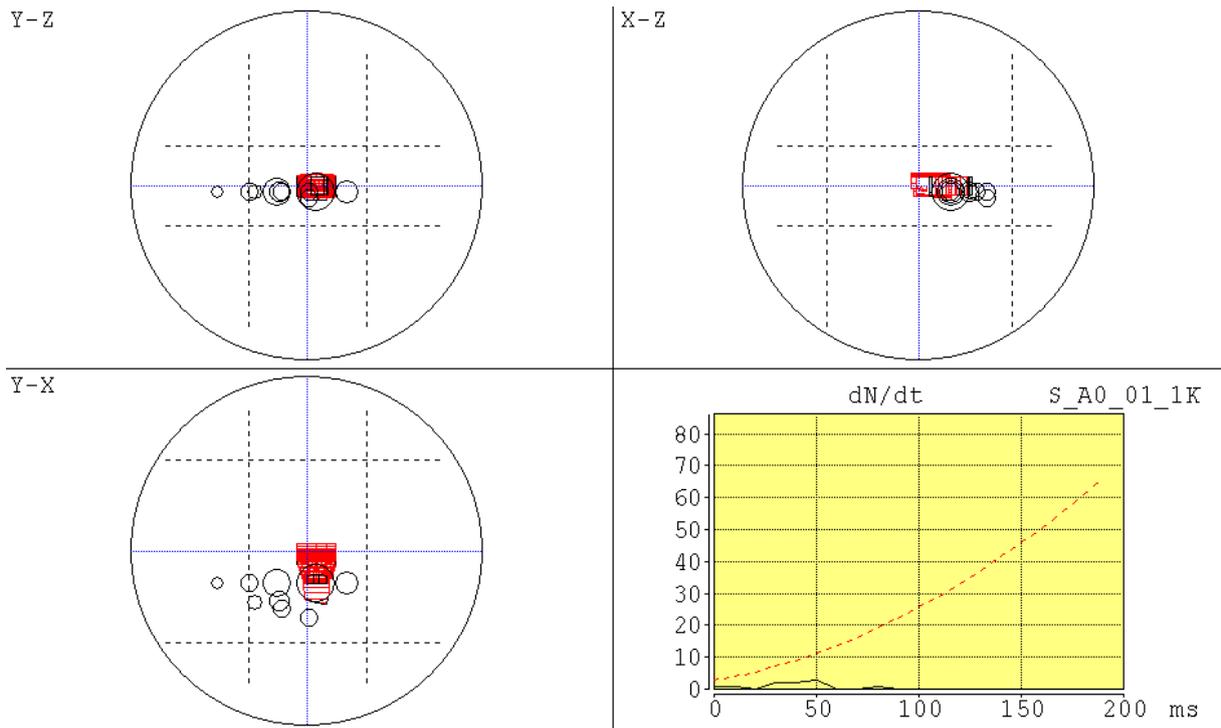


Figura 241: Sorgenti immagini calcolate nella figura precedente

### Metodo MIS

Il metodo MIS (*Mirror Image Source*) può essere applicato anche a riflessioni multiple (vedi figura).

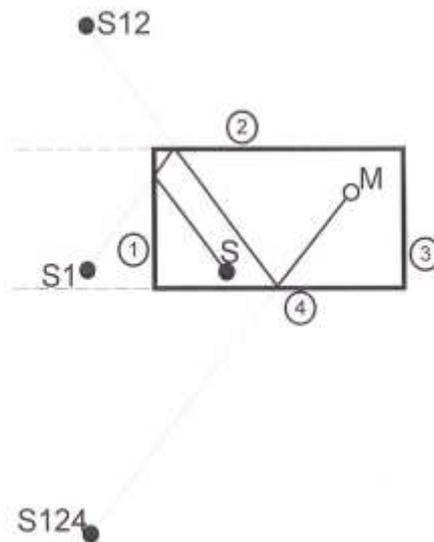


Figura 242: Schematizzazione del metodo MIS

Purtroppo il calcolo della visibilità del raggio dall'ascoltatore, anche per effetto della geometria complessa delle sale, richiede tempi lunghi e crescenti con l'ordine della riflessione.

Si osservi, inoltre, che ad ogni riflessione l'aliquota diffusa dalle pareti va crescendo e quindi si riduce la potenza del raggio riflesso.

Per questo motivo il metodo MIS viene applicato preferenzialmente e con buoni risultati per le prime riflessioni (di solito massimo 3) o per i primi 80-100 ms di transitorio.

Dopo prevalgono gli effetti diffusivi e riverberanti.

### Metodo Ray Tracing

Si immagina di discretizzare l'emissione sonora in raggi di data energia.

A questi raggi si applicano le regole dell'acustica geometrica e quindi della riflessione speculare.

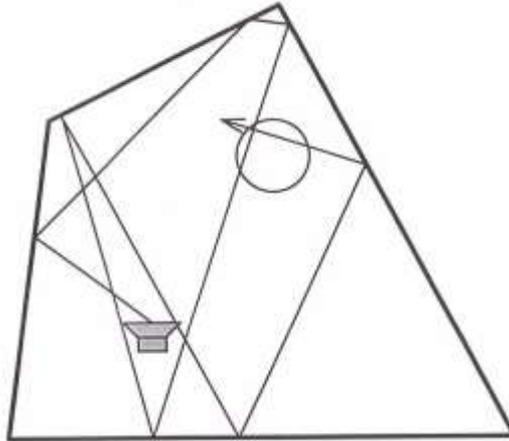


Figura 243: Schematizzazione del metodo Ray Tracing

L'ascoltatore, immaginato come un volume fittizio e trasparente, viene attraversato dai raggi riflessi che vengono tracciati in senso inverso fino ad arrivare alla sorgente.

Il livello di pressione sonora (SPL) è dato dal contributo energetico dei raggi sonori che attraversano l'ascoltatore.

Il metodo risulta inaccurato nel transitorio acustico e basato su considerazioni statistiche affette da incertezze di varia natura (numero di raggi, proprietà dei materiali, ...).

### Cone Tracing

Si immagina di avere raggi acustici conici che si allargano man mano che progrediscono e che si riflettono con le stesse regole dell'acustica geometrica.

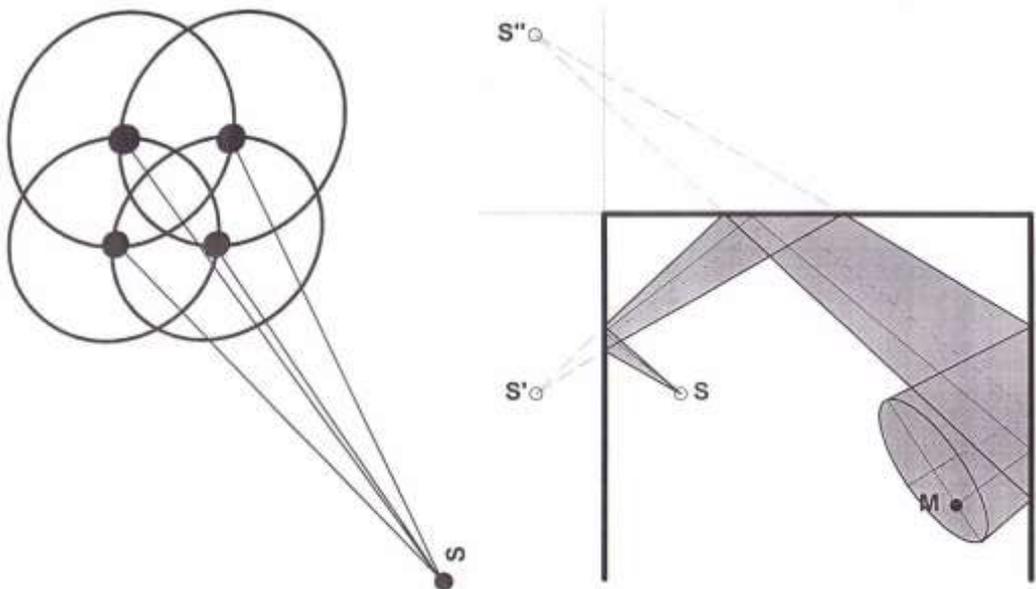


Figura 244: Schematizzazione del Cone Tracing

La copertura delle superfici con i raggi conici porta ad avere zone di evidente sovrapposizione che sovrastimano gli effetti.

### Raggi conici pesati

Per evitare i problemi della sovrapposizione di più raggi conici si applica una pesatura del tipo riportata in figura. In questo modo la copertura con i raggi pesati risulta buona e non si hanno effetti di rafforzamento dovuti alle sovrapposizioni dei raggi.

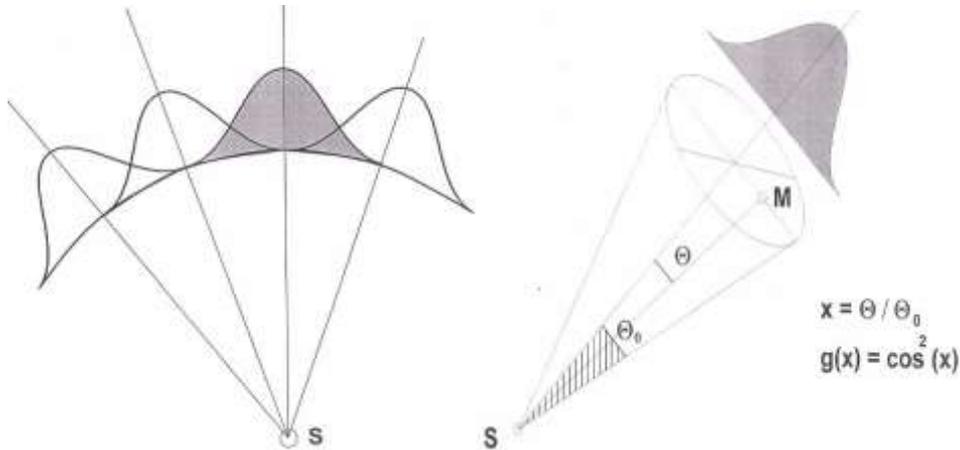


Figura 245: Schematizzazione del metodo dei raggi conici pesati

Con il metodo del tracciamento dei raggi conici (BTM) si fanno partire numerosi raggi conici dalla sorgente in tutte le direzioni e si applicano, a ciascun raggio, le regole già viste del ray tracing considerando gli assi dei coni. Perché il ricevitore possa avere un contributo sonoro da un raggio conico si debbono verificare due condizioni:

- Il ricevitore deve essere interno al raggio conico;
- Il ricevitore deve giacere davanti al piano che contiene la superficie sulla quale il raggio conico incide.

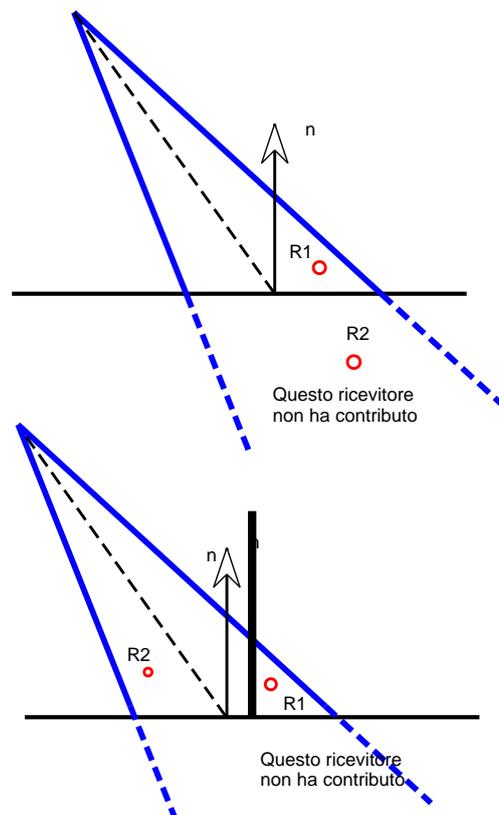


Figura 246: Condizioni geometriche per i raggi conici

Queste regole sono solo approssimate, visto che si segue solo l'asse del cono, ma vanno bene nella maggior parte dei casi. In genere si controlla che le linee dalla sorgente al ricevitore non siano intercettate da altri poligoni.

### 13.23.2. EFFETTO DELLA RIVERBERAZIONE ACUSTICA

L'acustica geometrica descrive molto bene le riflessioni acustiche ma non tiene conto degli effetti statistici (riverberazione acustica) che si hanno quando i raggi acustici si degradano energeticamente e si hanno effetti diffusivi non trascurabili.

In figura si vedono bene, nell'ecogramma, le riflessioni acustiche e, in grigio, la zona di decadimento acustico di tipo riverberante (coda sonora).

Si ottiene una ecogramma che copre una larga fascia temporale.

Nella figura in basso si può osservare l'effetto della coda sonora sul livello energetico: senza coda sonora si otterrebbero SPL molto bassi rispetto a quelli reali.

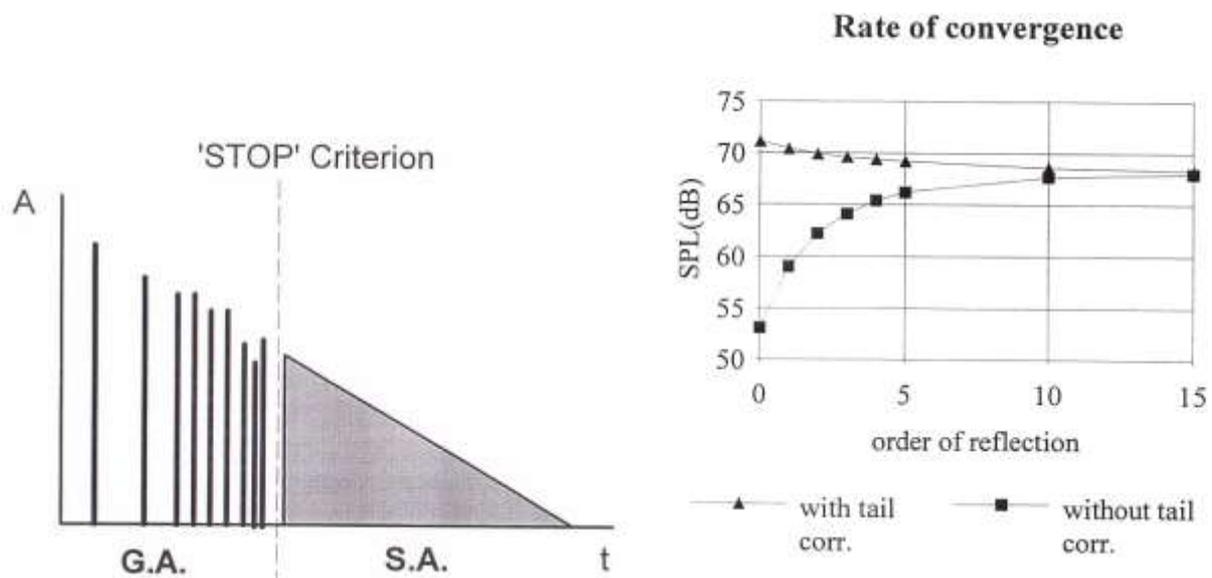


Figura 247: Visualizzazione della zona degli ecogrammi e della coda sonora (riverberazione)

Per tenere conto della coda sonora si utilizzano le relazioni classiche dell'acustica statistica con le relazioni per il calcolo del LPS in campo diffuso in ambiente chiuso già viste in precedenza.

$$L_p = L_w + 10 \log \left( \frac{4}{R} \right) \quad \text{con}$$

$$L_w = 10 \log \frac{W}{10^{-12}}, \quad W \text{ in Watt}$$

$$R = \frac{\sum S_i a_i}{1 - a_m}$$

In genere l'accoppiamento fra acustica geometrica (BRT) ed acustica statistica porta ad una riduzione notevole del tempo di calcolo.

Si osservi che la coda sonora non si ha se si considera una geometria aperta poiché mancano le riflessioni sonore.

Il metodo dei raggi conici (BTM) porta ad avere errori di calcolo (sovrastima) quando la base del raggio conico diviene maggiore della superficie su cui incide.

In alcuni CAD si usa il metodo della Falsa Immagine per compensare questi errori.

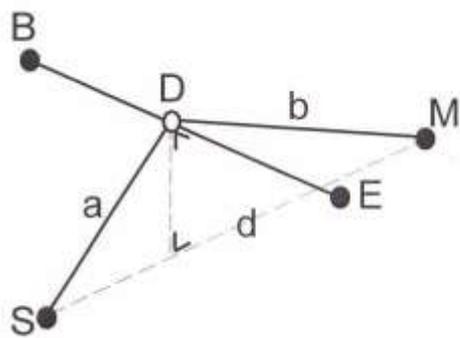
In ogni caso occorre proseguire il tracciamento del raggio non oltre un tempo detto critico corrispondente al tempo di eguaglianza fra la propagazione statistica di Sabine (quadratica) e quella geometrica del ray tracing.

Si applica allora alla coda sonora una correzione (detta *Continuous Tail Correction*) che tiene conto del rapporto fra il tempo statistico e quello critico sopra indicato.

In questo modo si diminuiscono anche i tempi di convergenza.

### 13.23.3. EFFETTI DELLA DIFFRAZIONE ACUSTICA

L'Acustica geometrica non tiene conto dei fenomeni di diffrazione che pure, soprattutto a bassa frequenza, si hanno sempre e hanno anche grande importanza. Di solito si valuta inizialmente il percorso di diffrazione del primo ordine che è la distanza minima fra ricevitore e sorgente e poi si calcola il contributo diffrattivo con il metodo di Kurze - Anderson illustrato nella figura.



$$\Delta L_B = 5 + 20 \log \frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh \sqrt{2\pi N}} \text{ (dB)}$$

$$N = 2 \left( \frac{a + b - d}{\lambda} \right) \quad \text{Fresnel-number}$$

Figura 248: Metodo di Kurze - Anderson

Il metodo si applica nel caso di diffrazioni multiple (per la presenza di più superfici di diffrazione) e l'LPS è dato dalla somma di tutti i singoli contributi.

Per superfici curve si considerano quattro o più punti (ad angoli eguali) lungo le superfici stesse e si applica il metodo sopra illustrato.

## 13.24. CAD ACUSTICI COMMERCIALI

Si hanno vari CAD Acustici in commercio. Ciascuno di questi utilizza uno o più criteri fra quelli prima indicati (ISM, RT, BTM, ...) e perviene a diversi risultati sia in forma tabellare che in forma grafica.

Molto importante in questi codici è l'interfaccia con l'Utente, cioè il modo con cui l'Utente interagisce con le varie sezioni dei codici (input, selezione ipotesi di calcolo, verifica, visualizzazione, stampa, esportazione in formati noti, ...).

Spesso si hanno codici scritti per varie piattaforme hardware e per vari sistemi operativi (PC, MAC, WINDOWS, UNIX, ...) e questo comporta, di solito, una maggiore rigidità nelle fasi di input a causa delle diverse possibilità offerte dalle piattaforme considerate.

Così, ad esempio, molti programmi sono stati scritti per computer con S.O. di tipo UNIX (inizialmente queste workstation offrivano maggiore potenza di calcolo ed una gestione della memoria non limitata come nei PC di una decina di anni fa) con interfaccia a caratteri e quindi le modalità di interazione erano (e ancora sono) del tipo a linea di caratteri con interprete di comando (CMD) che lanciava le varie sezioni del codice (*preprocessor, processor, postprocessor*).

In altri casi si utilizza XWINDOWS che, pur essendo una interfaccia grafica, resta legato al tipo di Desktop usato e alle librerie grafiche (2D e 3D) disponibili.

Per motivi commerciali questi codici di calcolo (molto complessi e scritti quasi sempre in FORTRAN) sono stati trasportati in WINDOWS una volta risolti i problemi della gestione della memoria. Il porting non è mai una operazione indolore e quasi sempre richiede una serie di compromessi operativi che limitano l'efficacia del codice stesso.

Oggi abbiamo computer di grande potenza elaborativa (sia in termini di velocità del processore che in quantità di RAM e HD disponibili) e pertanto la distanza fra le workstation UNIX e i PC con WINDOWS si sono fortemente ridotte.

Inoltre l'interfaccia più amichevole di quest'ultimo S.O. e la maggiore diffusione di mercato (di circa un fattore 10) ha convinto molti produttori di CAD Acustici a considerare la piattaforma WINDOWS come quella fondamentale di sviluppo, come avviene **EPIDAURE** della 01dB e per **RAYNOISE**® della LMS.

I programmi che hanno subito il porting da UNIX sono oggi stati modificati e in alcuni casi riscritti per la piattaforma WINDOWS usufruendo di una interfaccia più amichevole e nota.

Alcuni produttori di software stanno effettuando il porting anche dalla piattaforma MAC (una volta più potente graficamente e più amichevole di quella WINDOWS) alla piattaforma WINDOWS, come sta avvenendo per **MODELER**® della Bose.

Alcuni CAD Acustici sono nati in ambiente DOS e poi trasportati in WINDOWS per usufruire dei nuovi vantaggi in termine di grafica e di gestione della memoria. Questi nuovi CAD hanno in genere un problema di compatibilità con le versioni precedenti che in qualche caso si ripercuotono sull'efficacia e sulla funzionalità complessiva.

Altri programmi sono nati direttamente con WINDOWS ed hanno offerto fin dall'inizio una maggiore cura nell'interfaccia proprio perché ideati attorno ad una piattaforma grafica di grande impatto quale è WINDOWS, soprattutto dalle versioni 95 in poi. Oggi che la tecnologia NT è divenuta comune a tutte le versioni di WINDOWS si ha una prestazione ed una sicurezza complessiva comparabile e anche superiore alle workstation UNIX.

I CAD Acustici debbono risolvere problemi acustici connessi alle forma architettoniche delle sale e alle tipologie costruttive delle stesse e pertanto debbono avere la possibilità di riportare in forma numerica (l'unica che i codici elaborano) le forme grafiche (spesso anche molto complesse) delle sale.

Avere una interfaccia che renda più facile ed agevole questo lavoro è fondamentale per il corretto utilizzo del software, anche in considerazione della facilità di errore nel fornire i dati in sola forma numerica (coordinate dei vertici delle superfici, composizione delle superfici,..).

La scelta è fra le seguenti vie possibili:

- Digitare solo in forma numerica i dati (coordinate dei vertici delle pareti);
- Interpretare i dati numerici con un visualizzatore grafico per controllare l'input fornito;
- Utilizzare un CAD commerciale esterno di tipo standard che, dopo aver disegnato in 3D la struttura, riporti in forma opportuna i dati al CAD Acustico in modo possa adeguatamente interpretarli;
- Utilizzare un CAD interno e proprietario che consenta di disegnare in 3D la struttura e contemporaneamente avere i dati numerici necessari alle elaborazioni successive.

La scelta di una o più di queste possibili vie finisce per condizionare fortemente sia lo sviluppo che l'utilizzo del software.

### CAD grafico interno

Questa soluzione ha il grande vantaggio di fornire all'Utente un supporto grafico 3D immediato, inglobato nello stesso CAD Acustico e quindi non vi è necessità di ricorrere a software di altri fornitori per il disegno e l'input dei dati.

Sfortunatamente un CAD per il disegno 3D non è facile da implementare ma, soprattutto, non è facile da usare poiché richiede un tirocinio iniziale che può essere lungo e complesso. In genere i programmi di disegno vettoriale sono fra i più costosi e complessi fra quelli oggi disponibili commercialmente e l'Utente non ha molta propensione ad imparare l'utilizzo di software diversi. Ne consegue che la soluzione del CAD interno, pur essendo quella più diretta ed immediata per l'Utente, non è quella più gradita.

### CAD Grafico esterno

Una parte importante e corposa manca nel CAD Acustico (e ciò comporta anche una riduzione di costo) ma si richiede l'utilizzo di un software vettoriale esterno per il disegno in 3D della struttura. Tutto ciò potrebbe apparire come un ulteriore problema, oltre a quello della verifica acustica, ma occorre considerare che l'utilizzo del CAD Acustico è sempre effettuato successivamente alla fase di progettazione architettonica e che quest'ultima è oggi quasi esclusivamente effettuata mediante CAD grafici tridimensionali, quali AUTOCAD® o MICROSTATION® o ARCHICAD © o altri pacchetti commerciali che hanno la possibilità di esportare i dati numerici in opportuno formato mediante l'inserimento di MACRO opportunamente predisposte dai produttori dei CAD Acustici.

### CAD Interno ridotto

E' la soluzione intermedia fra quelle prima considerate e consiste nel fornire al CAD Acustico una versione minimale di CAD grafico, magari in forma di solo visualizzatore dei dati numerici forniti.

Questa riduzione delle capacità grafiche può apparire pesante ma in realtà va considerato che nella simulazione acustica delle sale vanno indicate solo le superfici che hanno effettiva influenza sul comportamento acustico e pertanto non si devono fornire particolari, magari architettonicamente importanti, aventi dimensioni inferiori ai 30-50 cm. In definitiva è anche possibile usare un editor grafico ridotto per i casi più semplici e poco complessi.

La possibilità di importare i dati dall'esterno da un CAD 3D potente e standard è di grande importanza. L'Utente continua ad usare il suo CAD grafico preferito e poi esporta i dati numeri automaticamente verso il CAD Acustico. E' anche possibile una comunicazione a doppia via fra CAD acustico e quello architettonico ad esempio con un formato di scambio standard (DXF).

E' questa la soluzione più adottata dai vari produttori di CAD Acustici ed è, probabilmente, anche la più coerente con l'obiettivo che un software di verifica acustica deve avere e cioè di ottimizzare il progetto architettonico.

Il tecnico acustico, infatti, è ben distinto dal progettista architettonico ed interagisce con esso sia durante la progettazione iniziale (metaprogetto) che in quella finale (ottimizzazione) della sala, come Y. Ando ha indicato.

### 13.24.1. ESEMPIO DI CAD ACUSTICO - RAMSETE

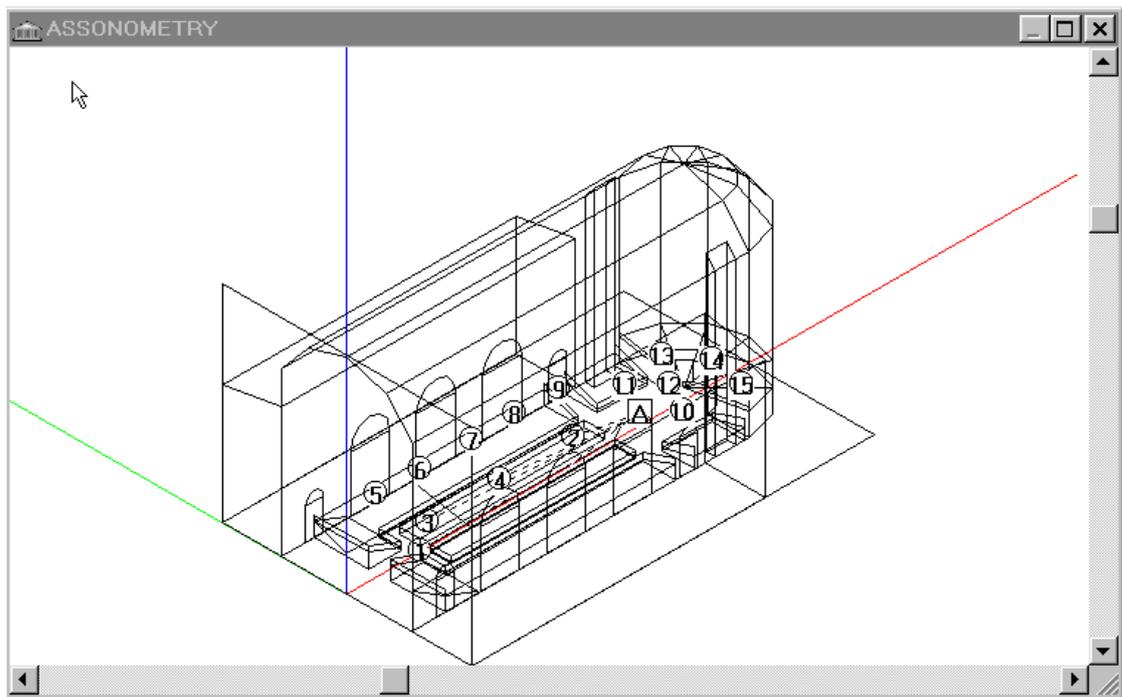


Figura 249: Esempio di modellazione di una sala

Nella Figura 250 e Figura 251 sono riportate due viste laterali della stessa chiesa.

In Figura 252 e in Figura 253 si ha un esempio di risposta impulsiva e curva di decadimento calcolate dal CAD acustico mediante tecniche di *ray tracing* con fasci complessi (piramidali).

Dalla curva di decadimento si può calcolare (col metodo di Schröder) l'andamento di T60 (tempo di riverberazione) e T10 (Early Decay Time), come riportato nella seguente Figura 254.

E' possibile posizionare sia le sorgenti sonore che i punti di ascolto nei quali si desiderano conoscere i vari parametri oggettivi calcolati. In Figura 255 si ha la pianta della chiesa esaminata nelle figure precedenti con i punti di osservazione.

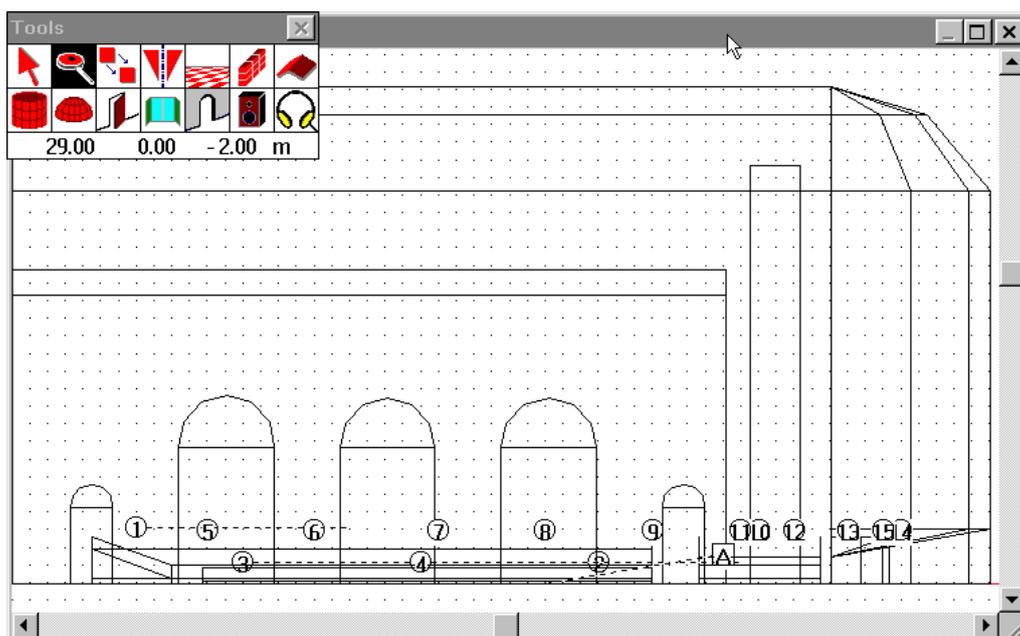


Figura 250: Modellazione trasversale di una chiesa

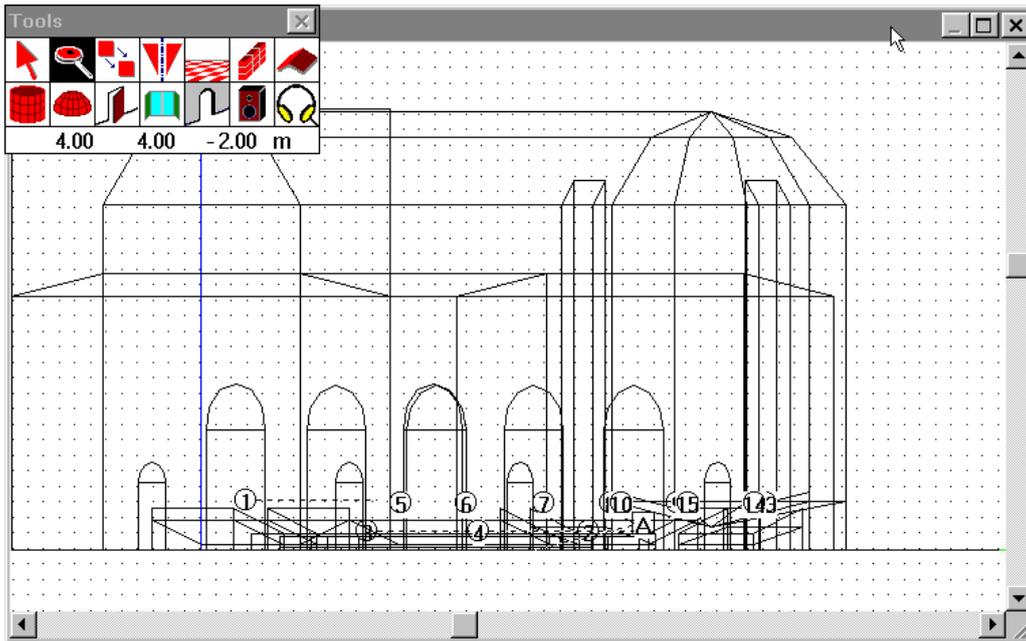


Figura 251: Altra modellazione trasversale di una chiesa

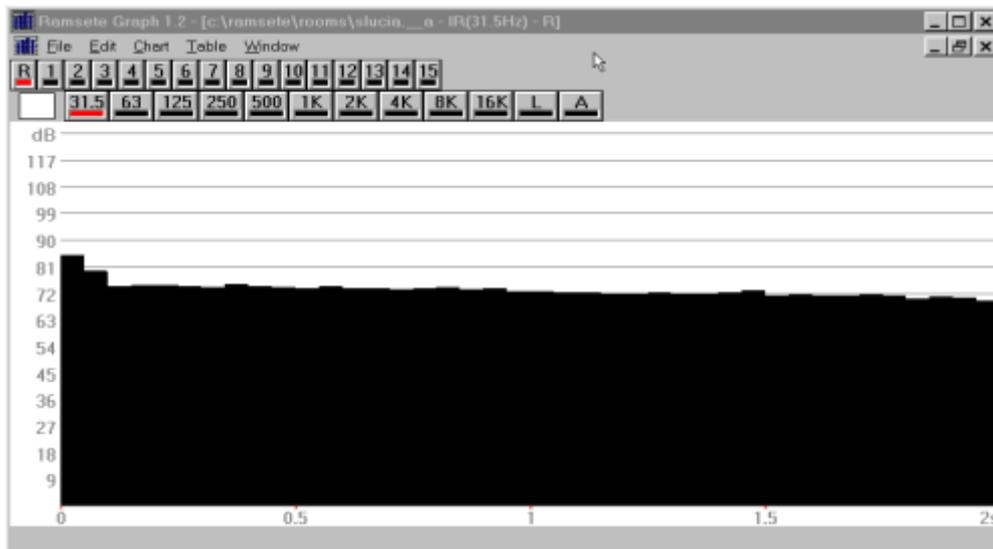


Figura 252: Risposta impulsiva calcolata

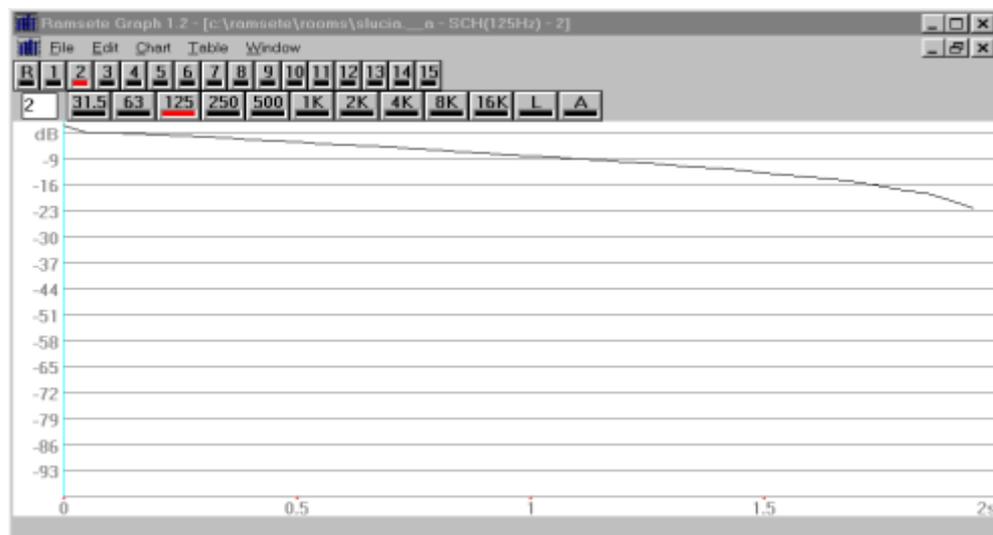


Figura 253: Curva di decadimento calcolata

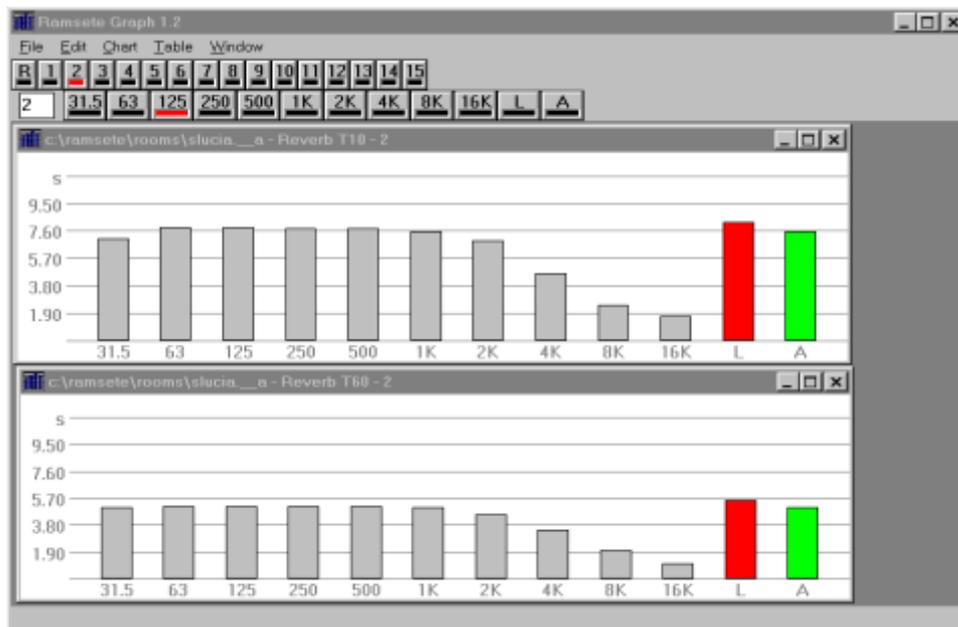


Figura 254: Calcolo dei tempi di riverberazione

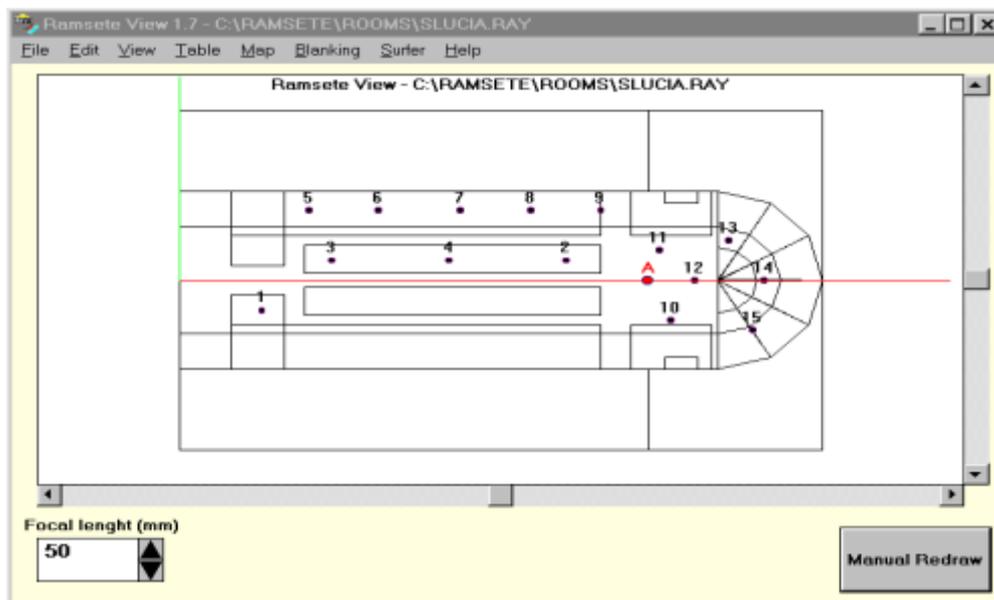


Figura 255: Disposizione dei punti di ascolto

Anche gli altri parametri oggettivi (C80 e D) possono essere calcolati dal CAD acustico, come mostrato nella Figura 289.

### 13.24.2. CAD ACUSTICO – CATT ACOUSTICS

Si tratta di un CAD acustico molto sofisticato, nato direttamente in ambiente WINDOWS e che utilizza vari metodi per la simulazione e il calcolo dei parametri acustici di una sala.

E' dotato di un modellatore solido con input numerico e di un visualizzatore grafico. Si ha anche un modulo di auralizzazione che può accoppiarsi anche a strumentazione hardware per il calcolo in tempo reale delle convoluzioni.

Questo CAD è molto potente e presenta un grandissimo numero di risultati di calcolo relativi ai descrittori oggettivi più usuali. La peculiarità di questo programma è di calcolare le riflessioni

immediate con il metodo delle immagini mentre le riflessioni ritardate sono calcolate con il metodo del ray tracing inverso.

La modellazione solida può anche essere effettuata, con più facilità operativa, mediante CAD esterni (del tipo AUTOCAD®) ed importata in CATT-Acoustic®. Sono disponibili le macro per AUTOCAD® per predisporre l'input dei dati in modo automatico. Questo software consente anche di simulare ambienti aperti e sorgenti multiple.

Il tempo di riverberazione,  $T_{60}$ , viene calcolato utilizzando la superficie di assorbimento reale quest'ultima valutata mediante la tecnica del ray tracing. Il numero dei descrittori acustici calcolato è elevato ed anche personalizzabile.

Mediante editor grafici propri o importando i disegni da AUTOCAD® si possono fornire tutti i dati necessari e visualizzarli nel modo più opportuno.

Si ricordi che non occorre disegnare la sala in tutti i dettagli ma solo a scala grafica-acustica, cioè rappresentando solo le pareti, strutture e dettagli aventi dimensioni significative per lo studio acustico.

### Nuovo Teatro Sangiorgi di Catania

È un teatro ricostruito nella sede del vecchio cinema Sangiorgi di Catania. È pregevole la sua vetrata in stile liberty. L'interno del teatro è stato rifatto alla fine degli anni 'novanta con lo scopo di avere una sala per musica sinfonica in aggiunta al Teatro Bellini.

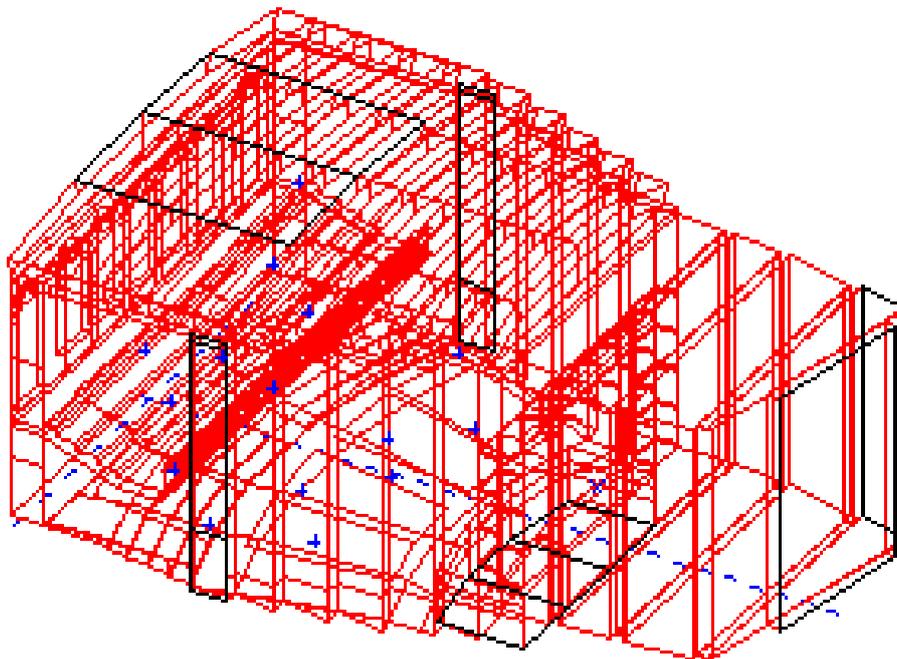


Figura 256: Rappresentazione 3D del Teatro Sangiorgi di Catania

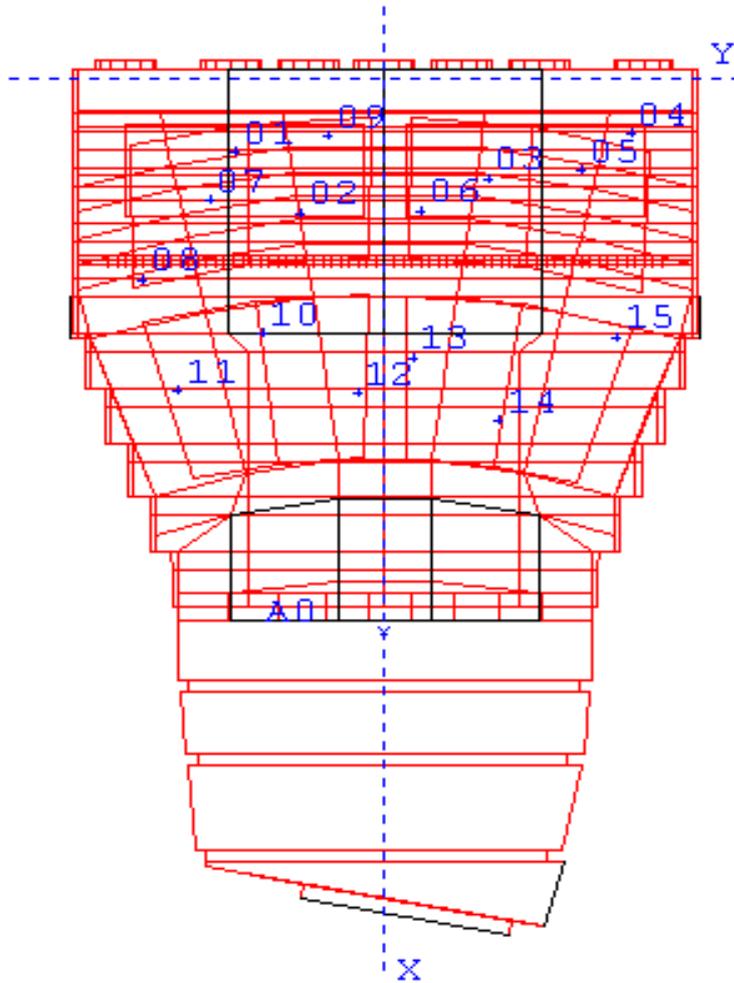


Figura 257: Posizionamento delle sorgenti e dei punti di ascolto

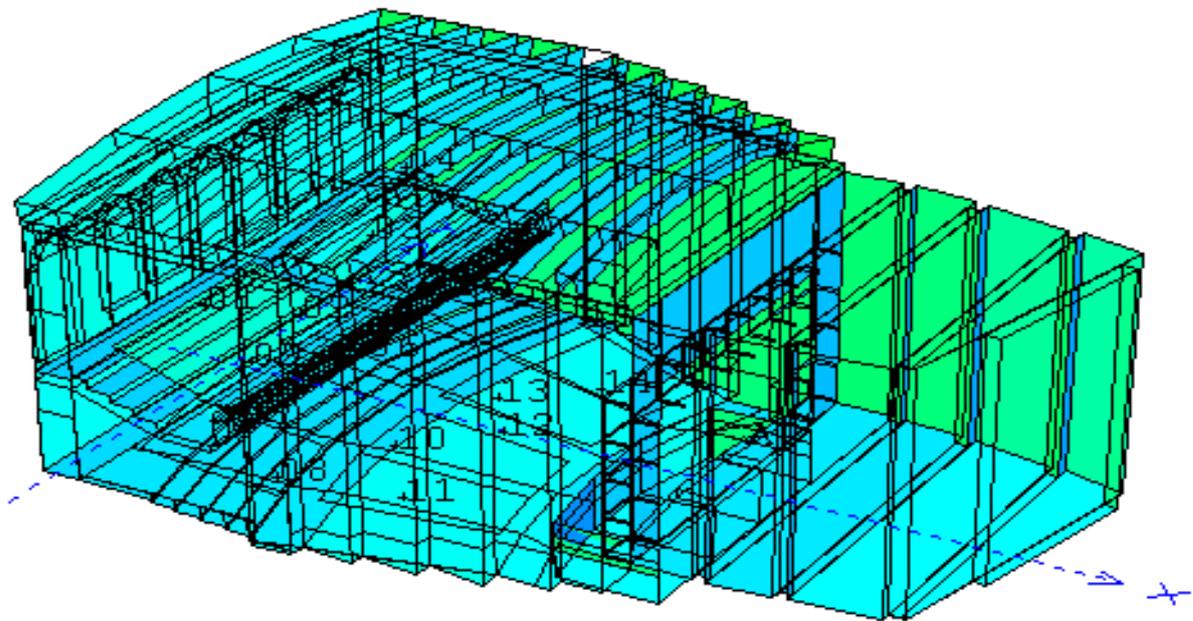
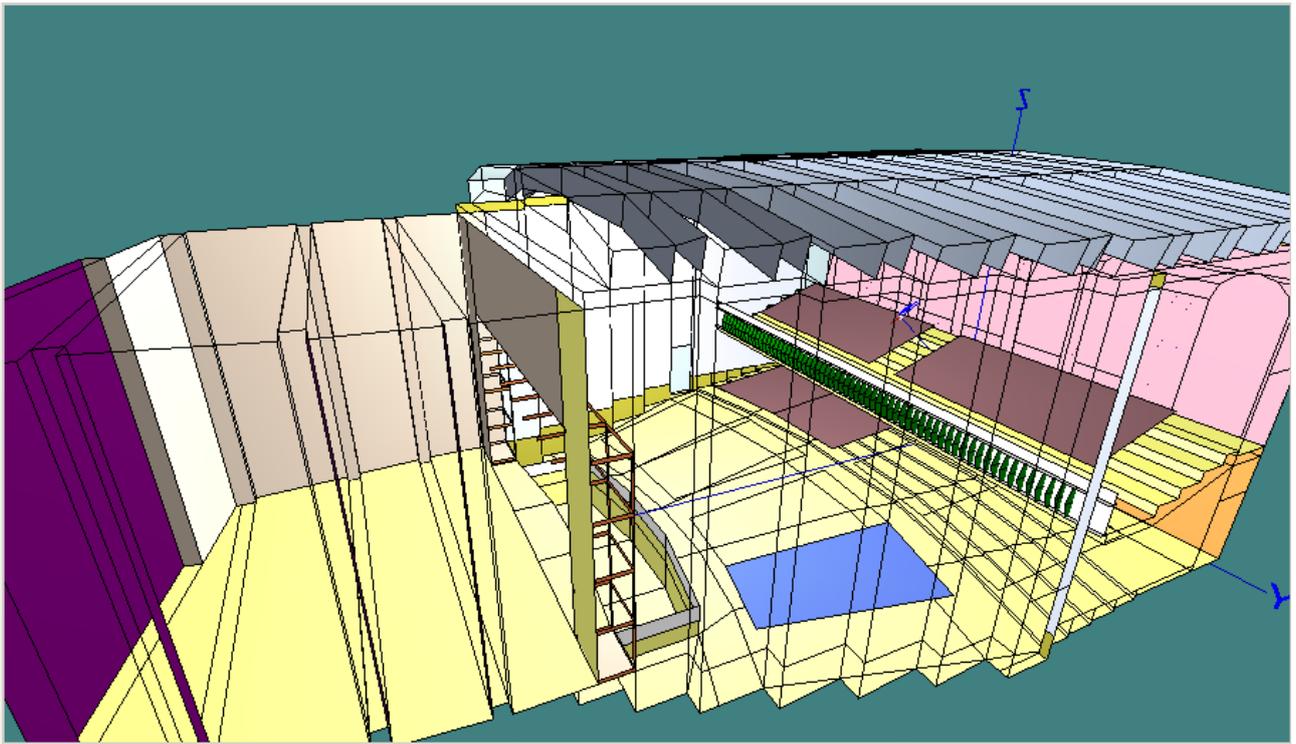
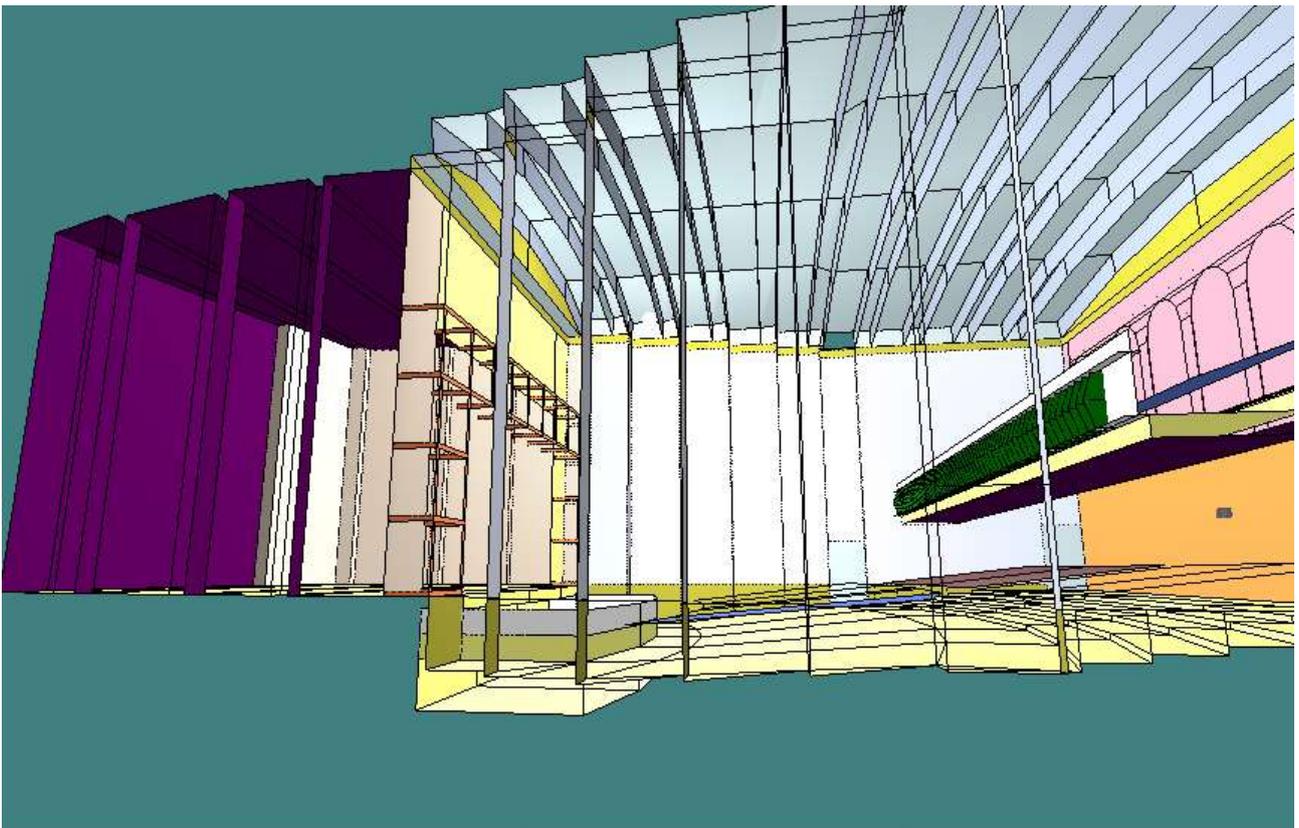


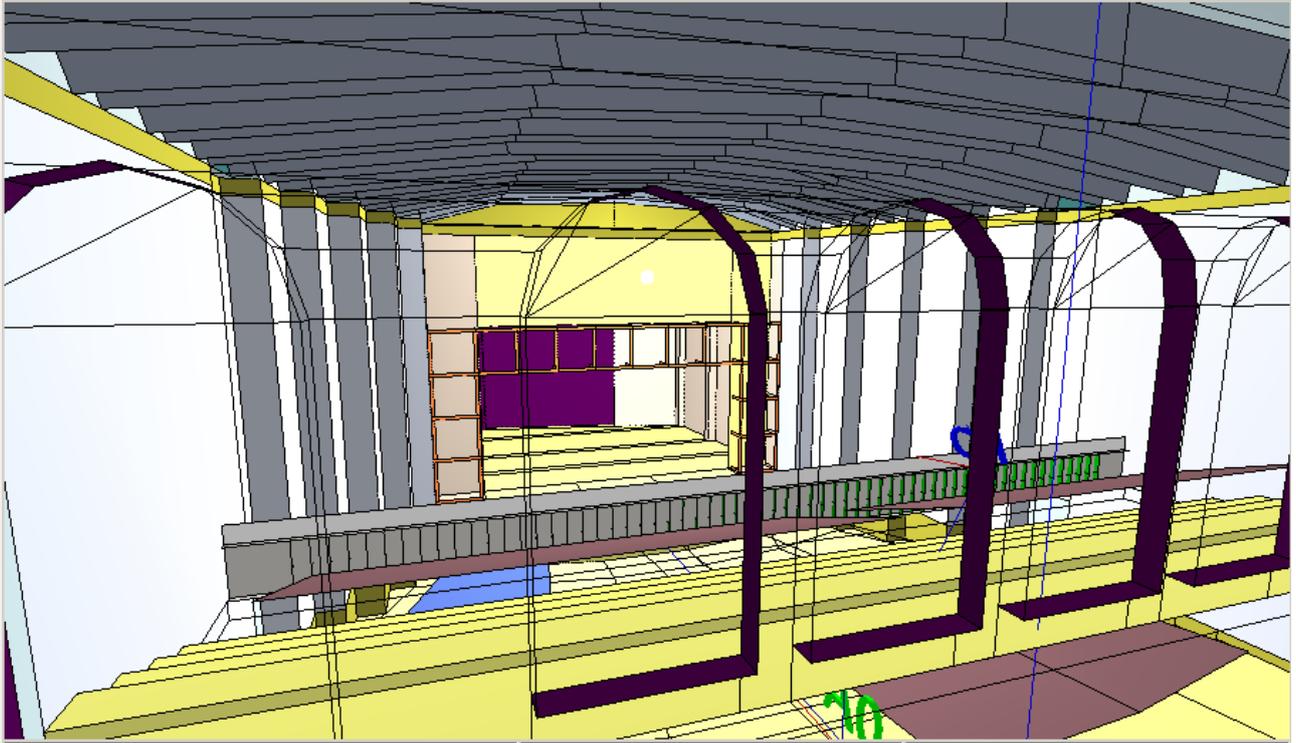
Figura 258: Rappresentazione 3D con raggruppamento delle pareti



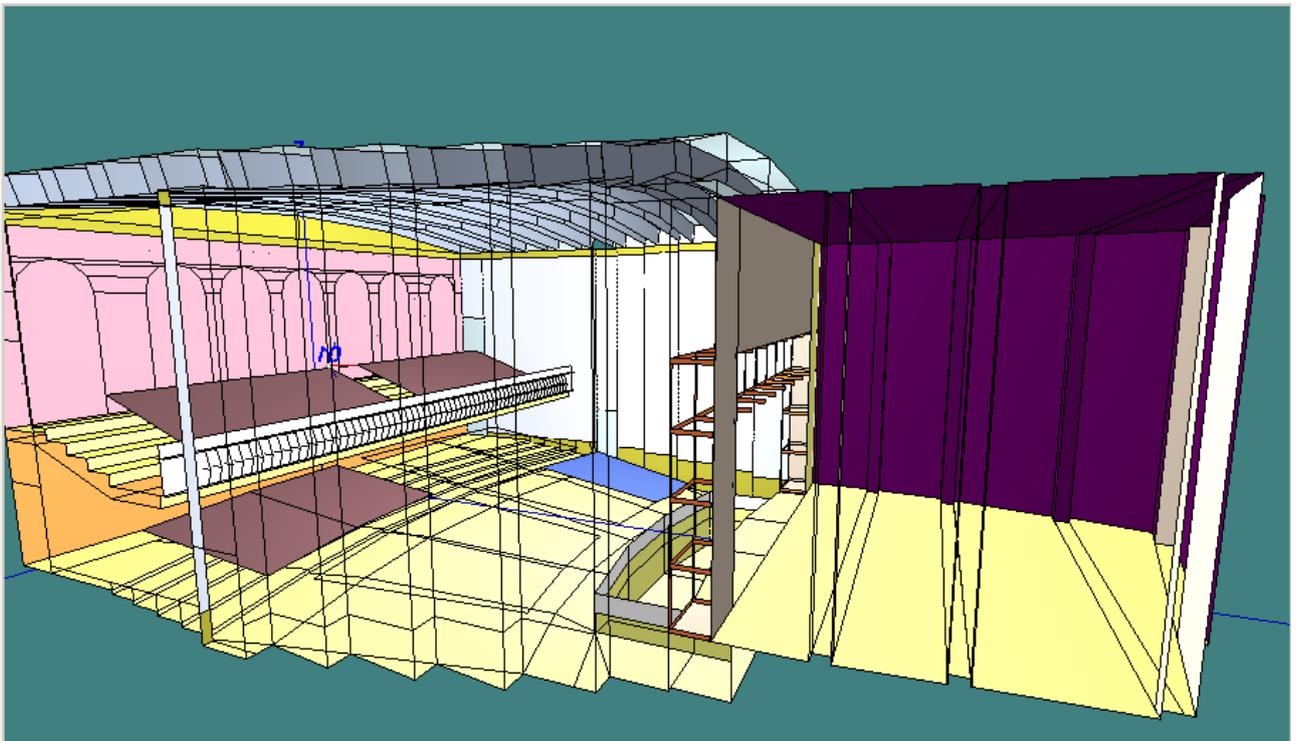
*Figura 259: Rappresentazione 3ED del Teatro Sangiorgi di Catania*



*Figura 260: Vista laterale 3D del Teatro Sangiorgi di Catania*



*Figura 261: Vista dalla parete di fondo del Teatro Sangiorgi di Catania*



*Figura 262: Sezione 3D del palco e della sala*

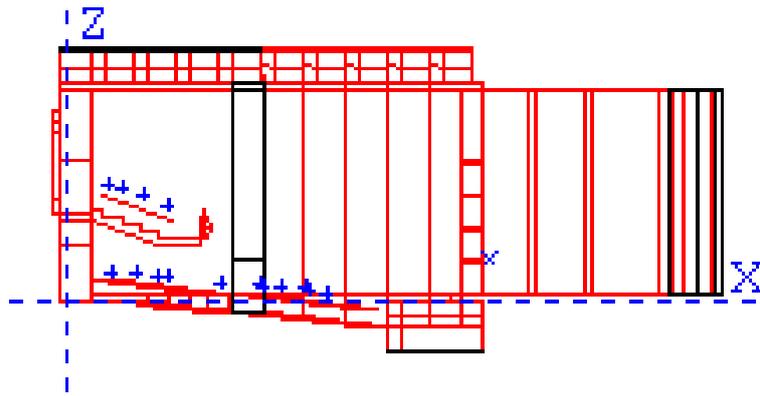


Figura 263: Sezione longitudinale

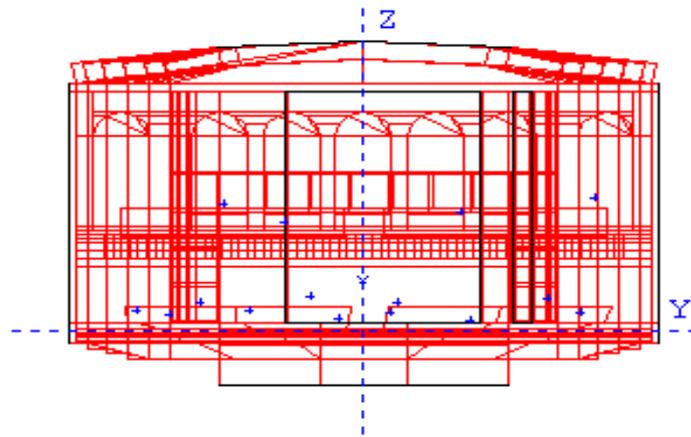
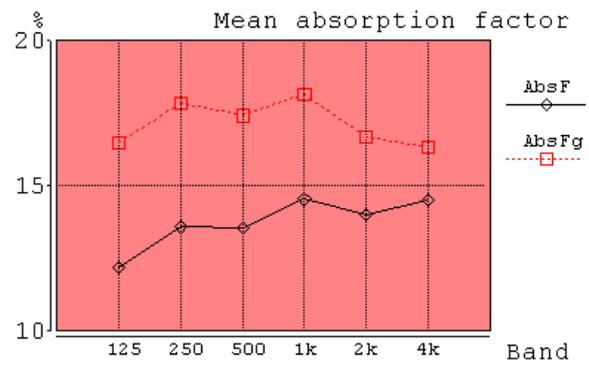
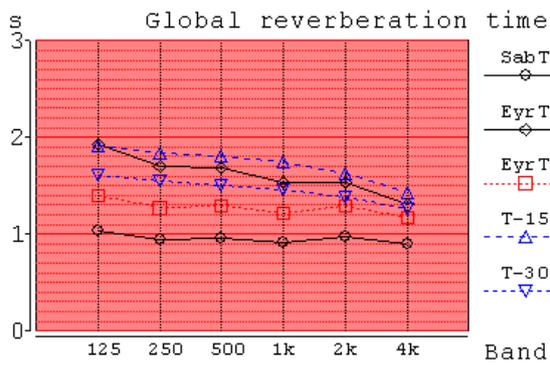


Figura 264: Vista della parete di fondo



	125	250	500	1k	2k	4k	
EyrT	1,93	1,71	1,68	1,54	1,54	1,30	s
EyrTg	1,40	1,27	1,29	1,22	1,29	1,17	s
SabT	1,03	0,95	0,96	0,91	0,97	0,90	s
T-15	1,91	1,83	1,81	1,75	1,63	1,42	s
T-30	1,61	1,55	1,50	1,46	1,39	1,26	s
AbsF	12,18	13,58	13,56	14,54	14,00	14,52	%
AbsFg	16,46	17,85	17,42	18,15	16,67	16,33	%
MFP	6,27	6,26	6,27	6,26	6,27	6,26	m
DiffS	12,80	13,01	13,23	13,51	13,64	13,86	%

Trunc 639,4 ms  
 Rays 19902 (used/oct)  
 373 (lost/oct)  
 12690 (absorbed/oct)  
 Angle 1,44 degrees

Figura 265: Alcuni risultati della simulazione del Teatro Sangiorgi di Catania

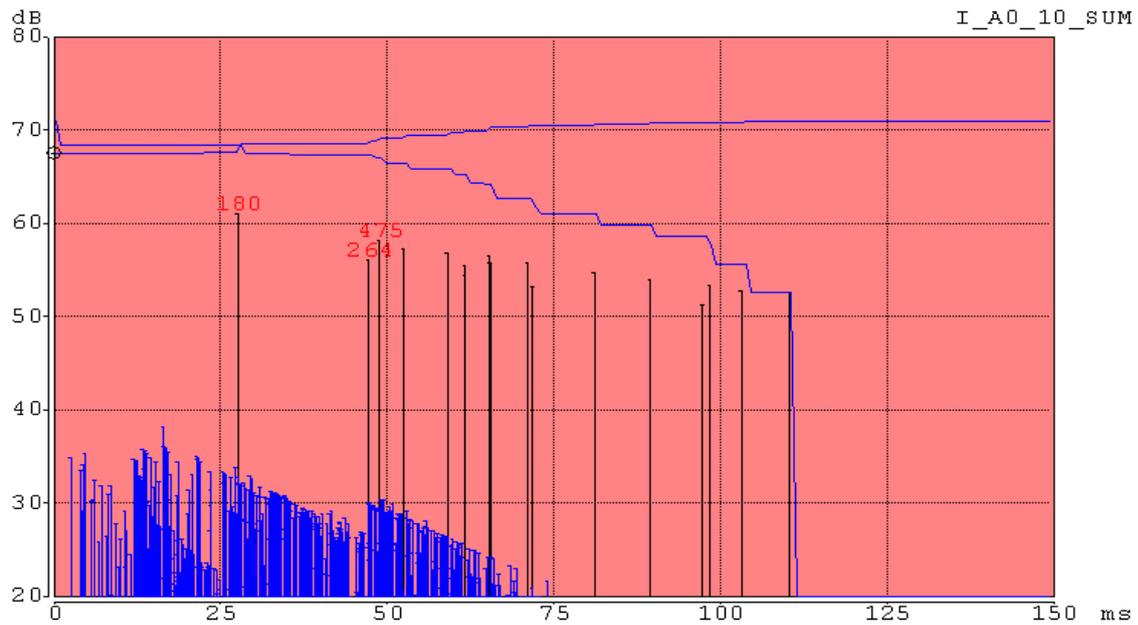


Figura 266: Ecogramma calcolato per il Teatro Sangiorgi di Catania

### Teatro Bellini di Catania

Si riportano i dati geometrici e i risultati per la simulazione del Teatro Bellini di Catania. E' un teatro storico, inizi del 1900, dell'architetto Sala.

E' un classico teatro lirico all'italiana.

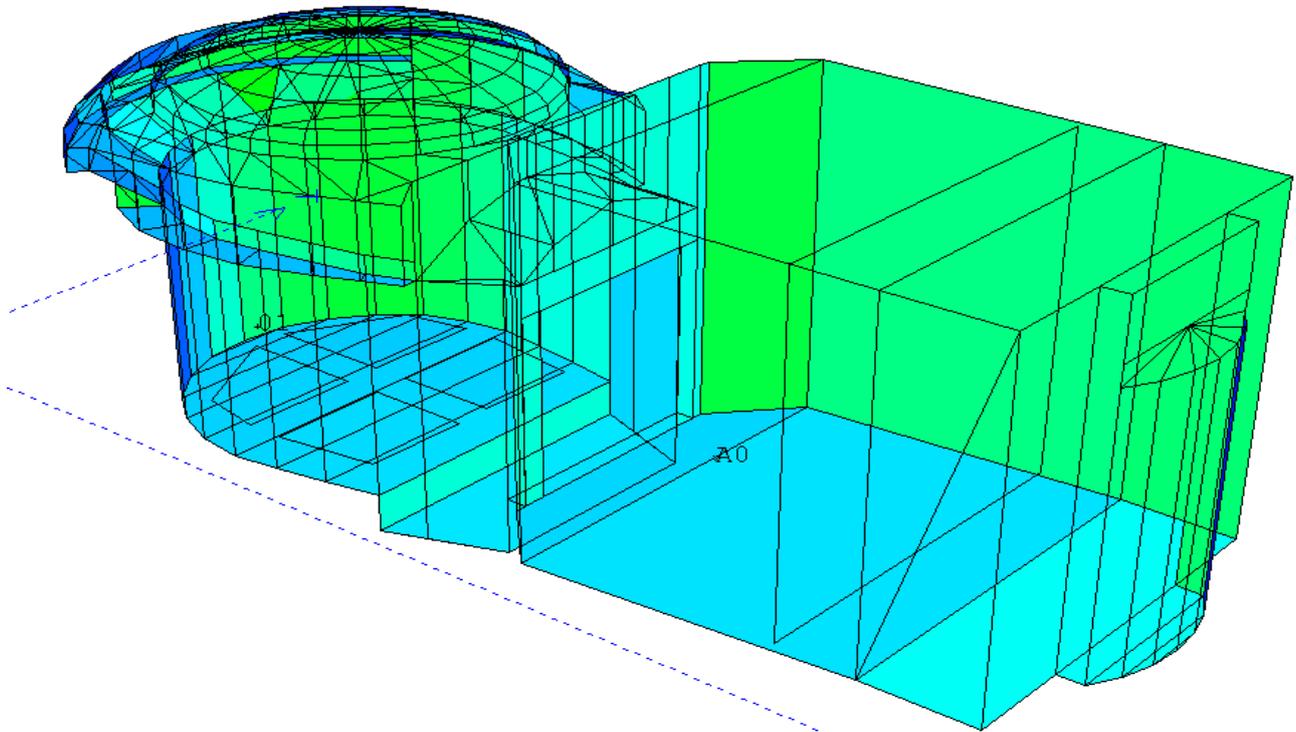
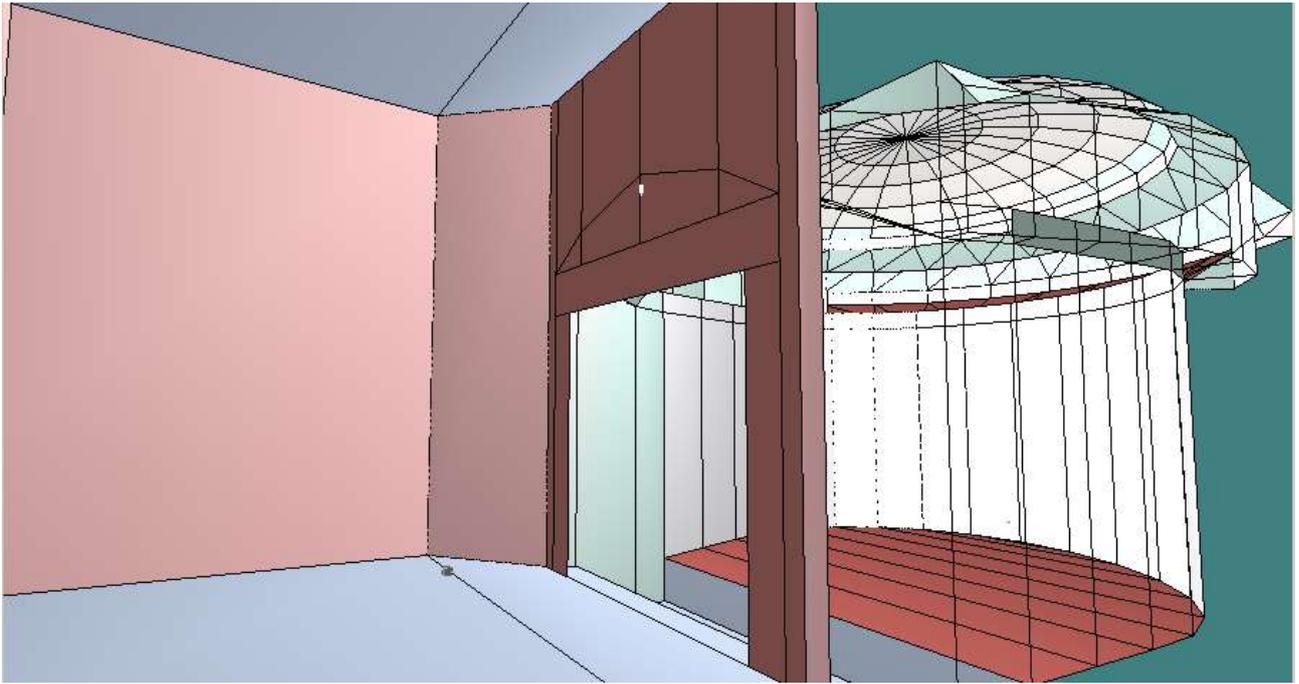
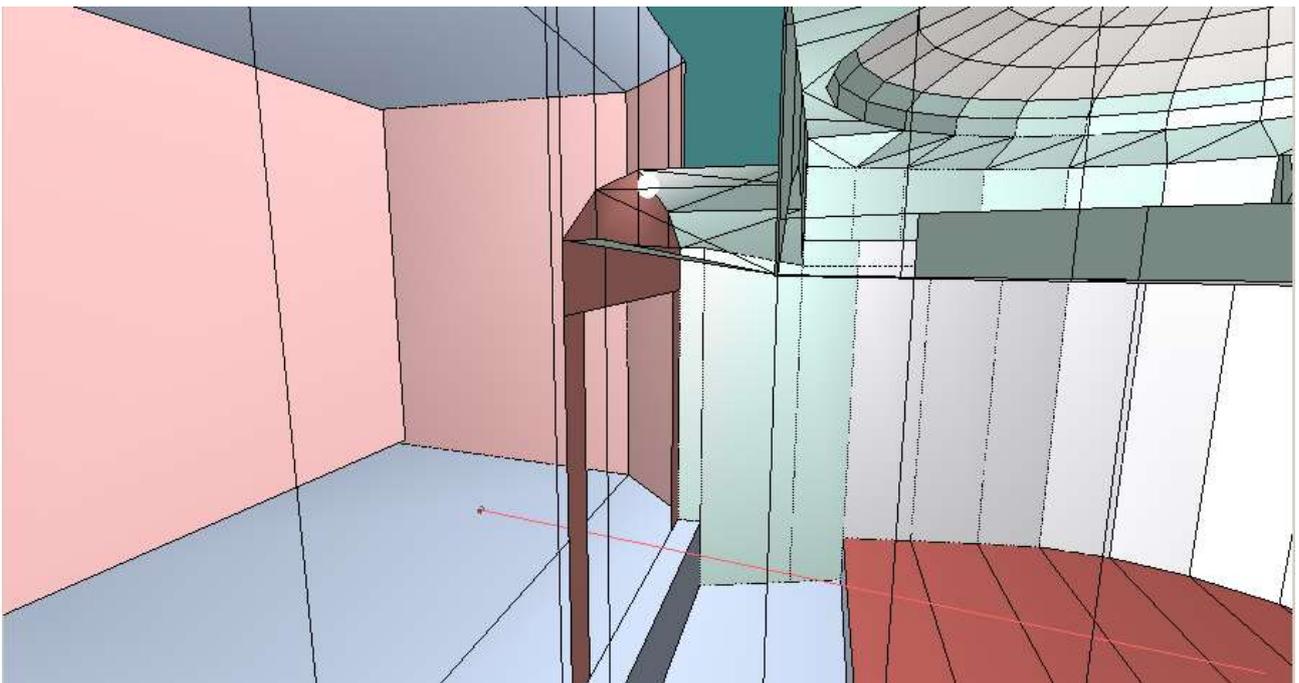


Figura 267: Vista 3D del Teatro Bellini



*Figura 268: Vista 3D del palco e della sala*



*Figura 269: Particolare del palco e del transetto*

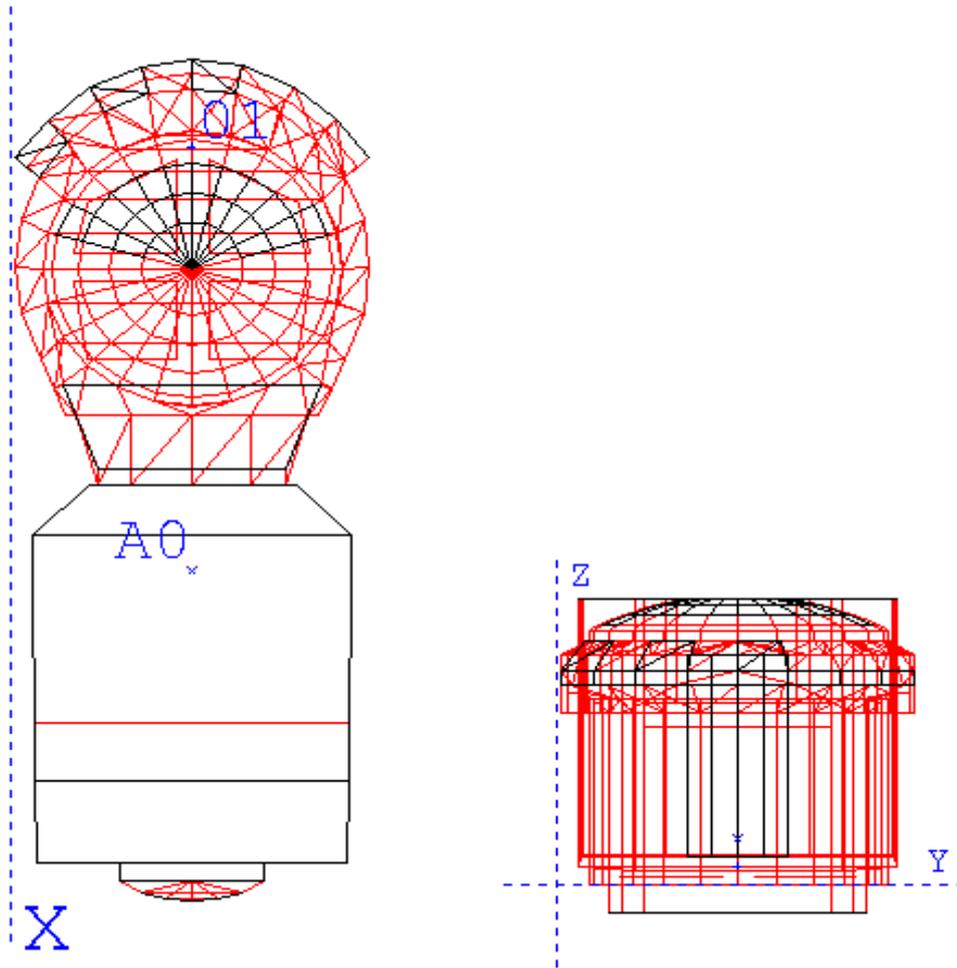
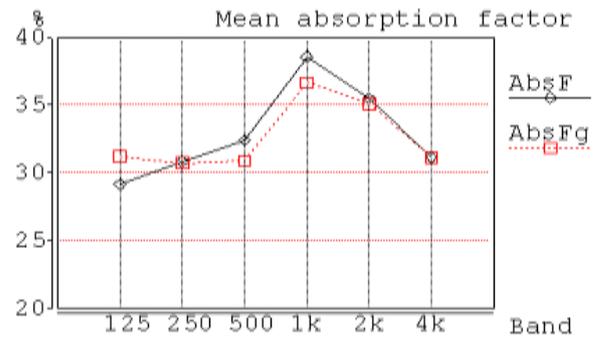
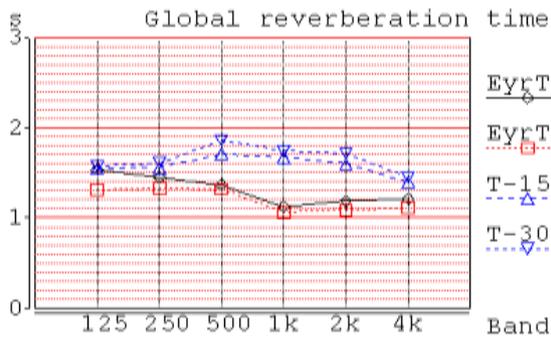


Figura 270: Posizionamento delle sorgenti e dei punti di ascolto



	125	250	500	1k	2k	4k	
EyrT	1,54	1,45	1,37	1,13	1,19	1,21	s
EyrTg	1,31	1,33	1,32	1,06	1,09	1,11	s
T-15	1,55	1,56	1,71	1,67	1,60	1,40	s
T-30	1,57	1,61	1,86	1,74	1,71	1,45	s
AbsF	29,13	30,82	32,39	38,56	35,50	31,14	%
AbsFg	31,17	30,73	30,87	36,64	35,11	31,13	%
MFP	12,07	12,16	12,11	12,17	12,07	12,25	m
gam2	0,48	0,47	0,47	0,47	0,48	0,47	
Diffs	31,67	34,98	42,62	45,78	47,77	49,74	%

Trunc 2000,0 ms  
 Rays 1938 (used/oct)  
 Rays 0 (lost/oct)  
 Angle 4,62 deg

Figura 271: Risultati di calcolo per il Teatro Bellini di Catania

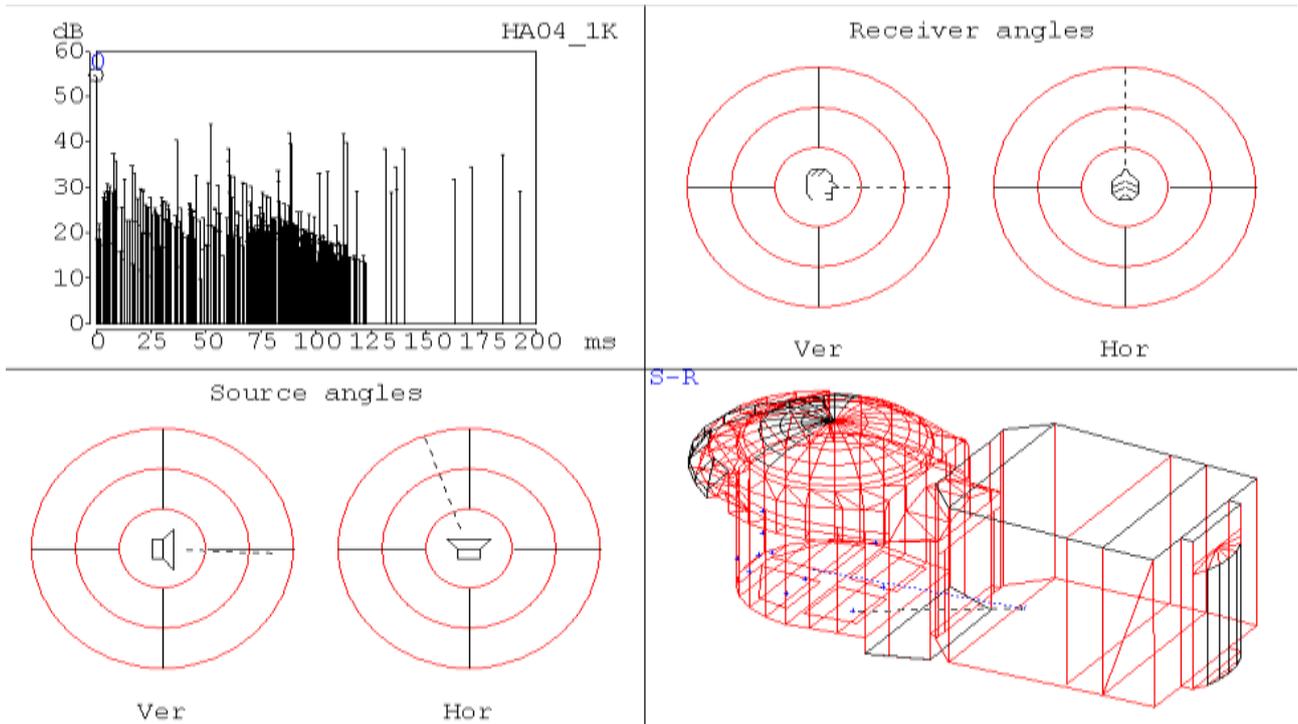


Figura 272: Ecogramma e alcuni percorsi con riflessioni laterali

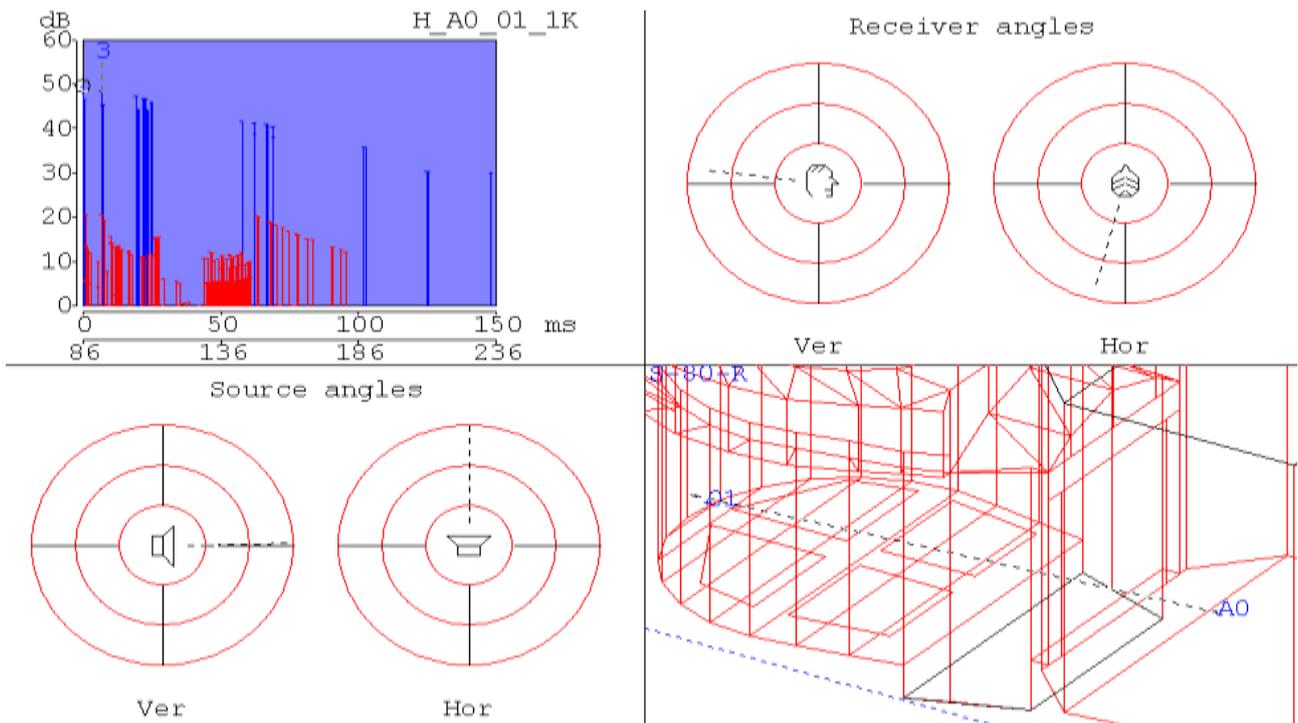


Figura 273: Ecogramma e riflessione della parete di fondo

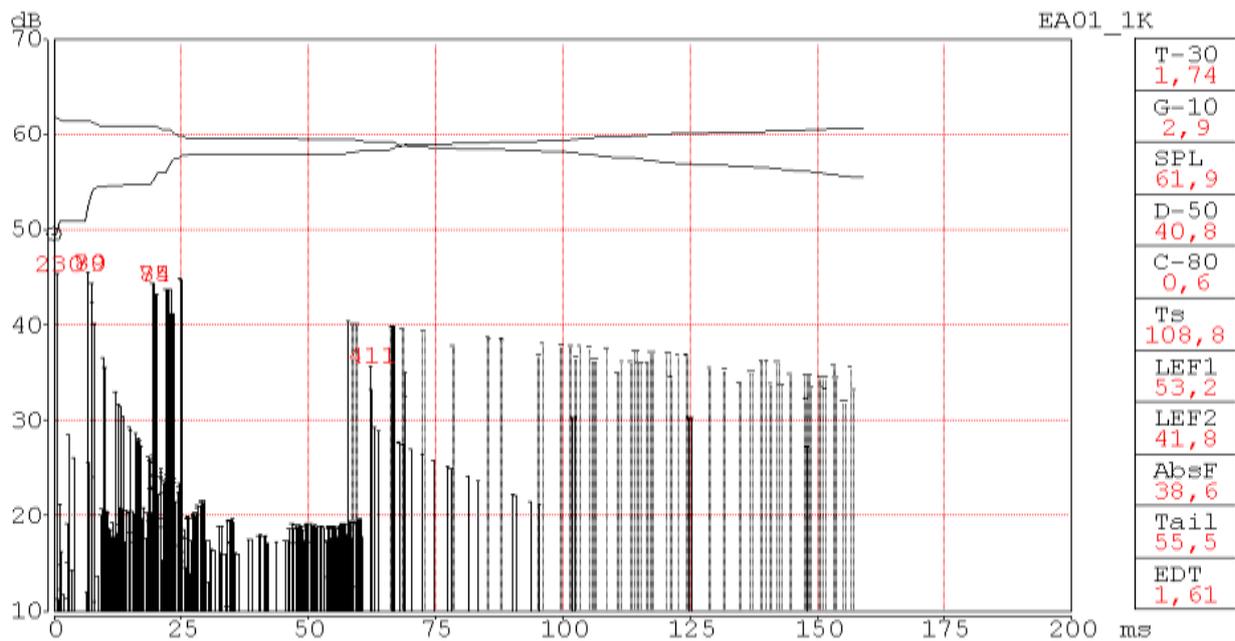


Figura 274: Ecogramma calcolato per il Teatro Bellini di Catania

### Descrizione della geometria in CATT Acoustics

Questo CAD può ricevere i dati di input in un file detto Geo-File nel quale si hanno non solo dati geometrici ma anche direttive che verranno interpretate al momento della lettura.

In pratica il programma interpreta il Geo-File al momento dell'esecuzione fornendo la possibilità di eseguire comandi condizionati e direttive di vario genere.

Il Geo-File contiene le seguenti informazioni:

- Nodi del modello in numero praticamente illimitato;
- Organizzazione gerarchica del Geo-File con possibilità di strutturazione geometrica:

Main hall

Reflectors

Extra reflectors

Audience

- Possibilità di scalare, ruotare, rispecchiare gli oggetti;
- Possibilità di usare costanti simboliche ed espressioni aritmetiche con chiamata a funzioni matematiche;
- Costanti stringa;
- Possibilità di allineare gli angoli;
- Possibilità di utilizzare librerie multiple di dati di assorbimento e diffusione.

Per la struttura di figura il Geo-File (di nome MASTER.GEO) è riportato di seguito.

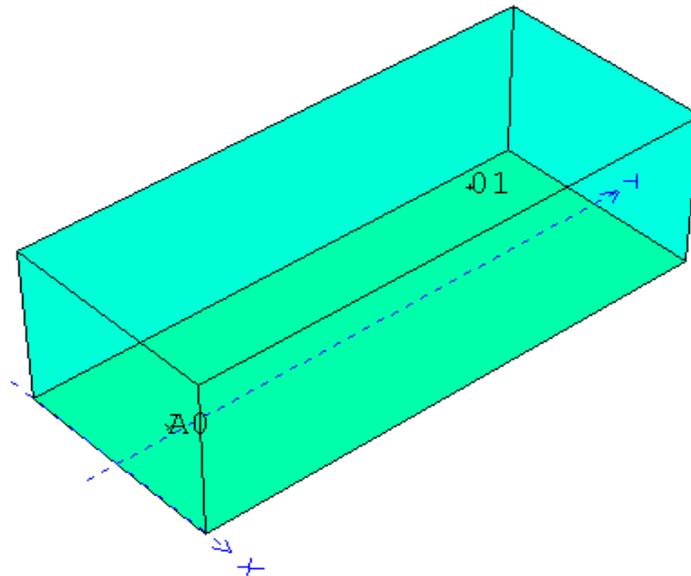


Figura 275: Sala esempio per il Geo File

Si osservi che gli assi x, y, z sono disposti nel modo seguente:

Asse x da sinistra a destra;

Asse y orientato verso la zona di audience;

Asse z verso l'alto.

Questo sistema di riferimento consente al visualizzatore di funzionare correttamente.

```

;MASTER.GEO
;constant declarations
LOCAL h = 8           ;hall height
LOCAL w = 10          ;hall width
GLOBAL d = 24         ;hall depth
; absorption and diffusion factors 125Hz to 4kHz [%]
ABS audience = <40 50 60 70 80 80> L <30 40 50 60 70 80>
ABS wood = <15 13 10 9 8 7> L <30 30 30 30 30 30>
CORNERS
;floor corners
1      -w/2      0      0
2      -w/2      d      0
3      w/2       d      0
4      w/2       0      0
;ceiling corners
11     -w/2      0      h
12     -w/2      d      h
13     w/2       d      h
14     w/2       0      h
PLANES
[1 floor / 4 3 2 1 / audience ]
[2 ceiling / 11 12 13 14 / wood ]
[3 stage wall / 1 11 14 4 / wood ]
[4 rear wall / 3 13 12 2 / wood ]
[5 left wall / 2 12 11 1 / wood ]
[6 right wall / 4 14 13 3 / wood ]

```

Figura 276: File MASTER.GEO della forma di esempio

L'origine può essere posta dove si vuole ma è bene porla lungo l'asse di simmetria della sala nel proscenio. E' bene tracciare l'asse Y nella direzione maggiore della sala perché la visualizzazione delle figure è ottimizzata per la dimensione maggiore. I dati di output sono calcolati da 125 a 4 kHz. Si ricordi, infatti, che le frequenze inferiori a 100 Hz non sono compatibili con l'*Acustica Geometrica*.

Questo è ancor più vero per piccole sale (quale uno studio) per le quali i risultati divengono affidabili da 500-1000 Hz in poi. Nella nuova versione si hanno anche le frequenze di 8 e 16 kHz.

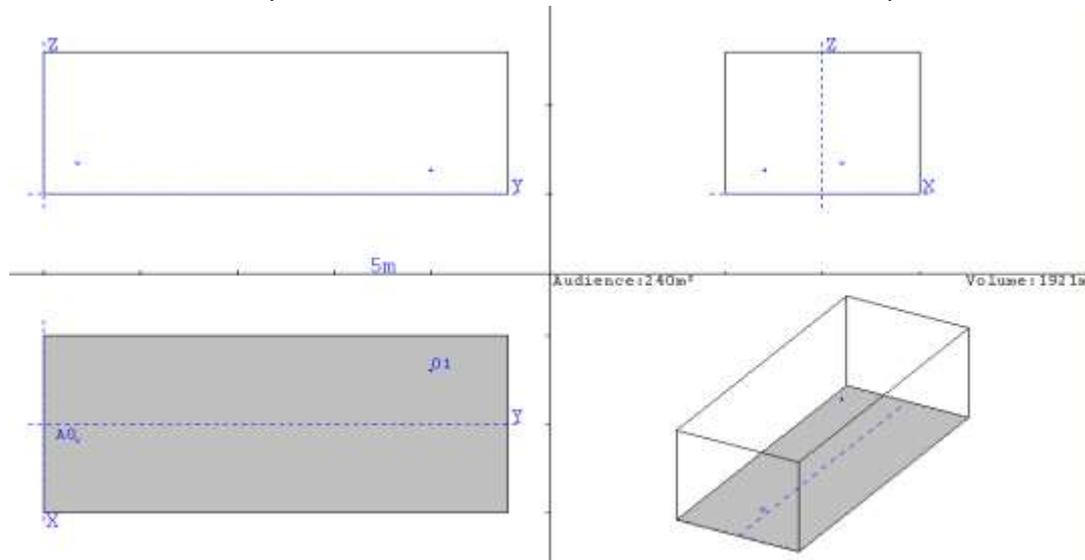


Figura 277: Rappresentazione del Teatro di esempio

La direttività della sorgente viene costruita con l'apposito modulo (menù Windows/Directivity) che consente anche di importare i dati e/o di modificare quelli esistenti. Nella versione 8 in preparazione si aggiungono anche le frequenze di 8 e 16 kHz.

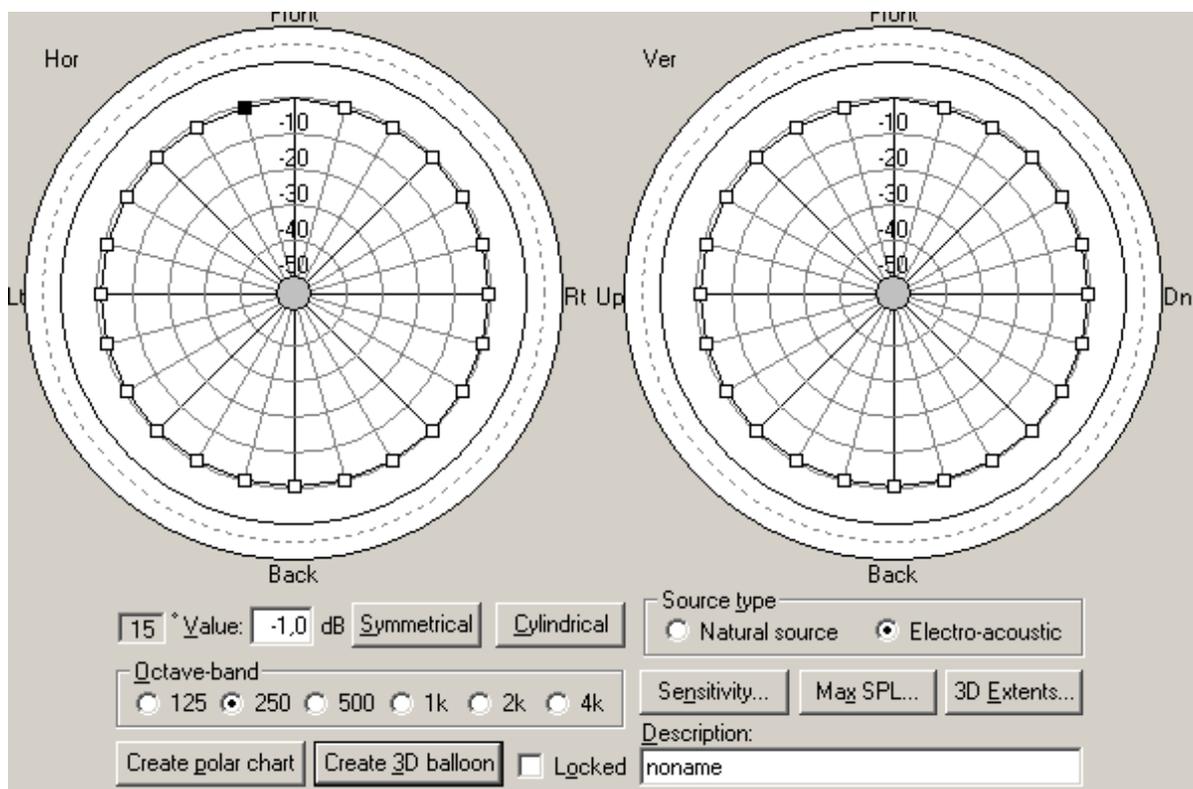


Figura 278: Direttività della sorgente

Dal Menù *WINDOWS- Surface Properties* si accede ad una finestra di dialogo che consente di editare, inserire, visualizzare le proprietà relative all'assorbimento e alla diffusione dei materiali elencati nella libreria ABSLIBxx.DAT che può essere modificata dal menù FILE-Preferences. E' importante controllare sempre questa libreria.

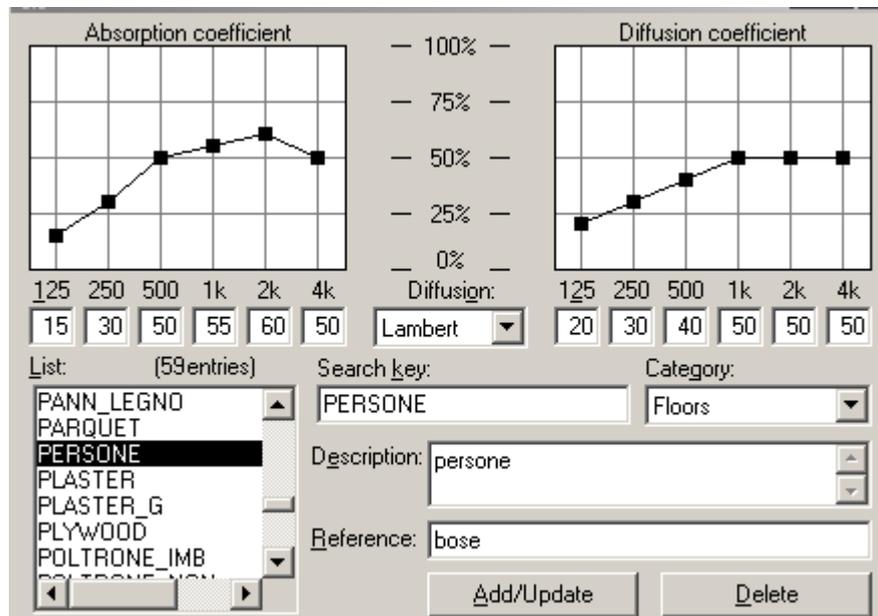


Figura 279: Selezione dei materiali

### Dati di Calcolo e Output

I dati di output possono essere calcolati e stampati in qualunque combinazione fra:

260 sorgenti (A0-A9)

100 ricevitori (00-99)

Qualunque combinazione di bande di ottava e power sum.

I dati di calcolo sono raccolti in file che hanno le seguenti iniziali:

- A Mappatura dell'area di audienza;
- E ISM dettagliata della parte iniziale (early);
- F Calcolo totale dettagliato;
- D Modulo di direttività;
- M Modulo di sorgenti multiple;
- P Modulo di *postprocessing* (per l'auralizzazione).

CATT Acoustic si distingue per un elevatissimo numero di dati calcolati e quindi di file di output disponibili.

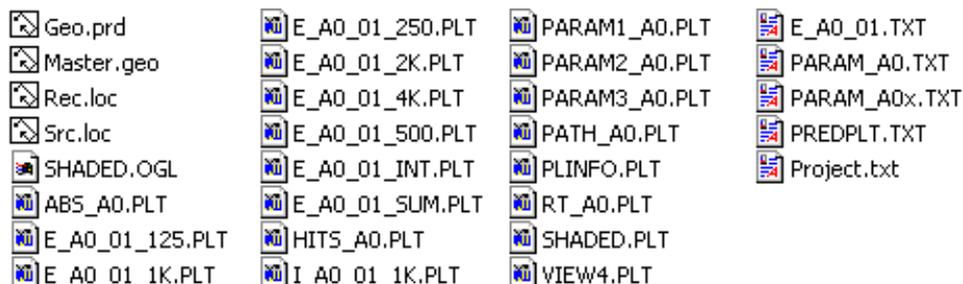


Figura 280: Elenco dei files prodotti dal calcolo

Il modulo *PREDICTION* di *CATT-Acoustic©* consente di effettuare i calcoli di simulazione (*Prediction*) in tre modi diversi:

- Riflessioni immediate (early reflections) basate sul metodo ISM con l'aggiunta della prima riflessione;
- Color Mapping dell'area di ascolto (Audience Area);

Figura 281: Selezione dei parametri da calcolare

Calcoli totali dettagliate con possibilità di esportazione ai programmi esterni o ad altri moduli del *CATT-Acoustic©*. Le ipotesi di calcolo sono archiviate in un setting-file che ha l'estensione .PRD.

I file di output possono essere numerosi in funzione delle richieste fatte nelle selezioni del setting-file. La convenzione usata è:

ss      source id      [A0.....Z9]  
 rr      receiver-id    [00..... 99]  
 oct     octave-band    [125, 250, .. 4k].

### Visualizzazione dei risultati

Si presentano alcuni dei numerosi risultati ottenibili dal calcolo.

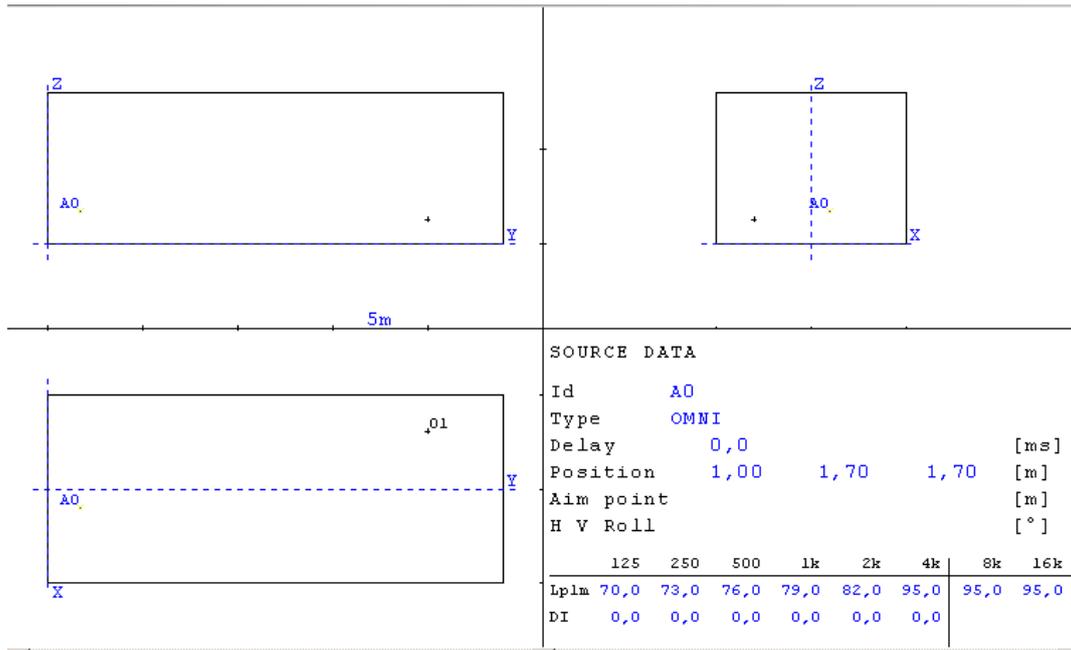


Figura 86: Visualizzazione dei punti sorgenti e ricevitore

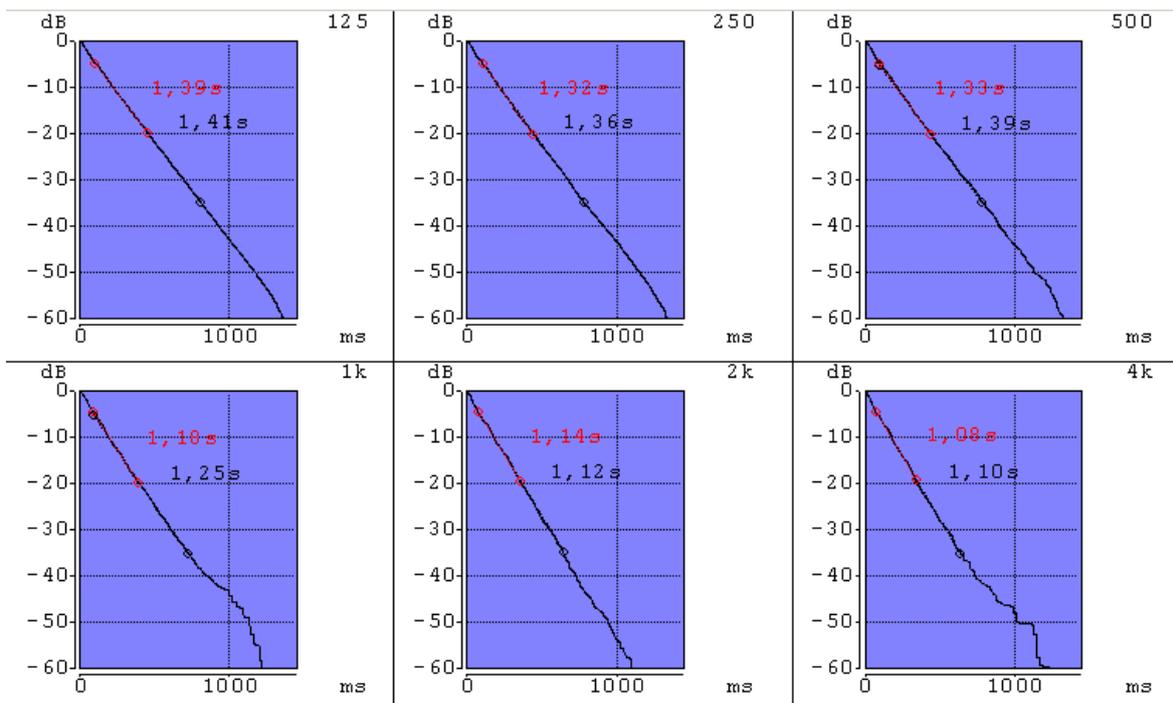


Figura 282: Tempo di Riverberazione simulato a varie frequenze

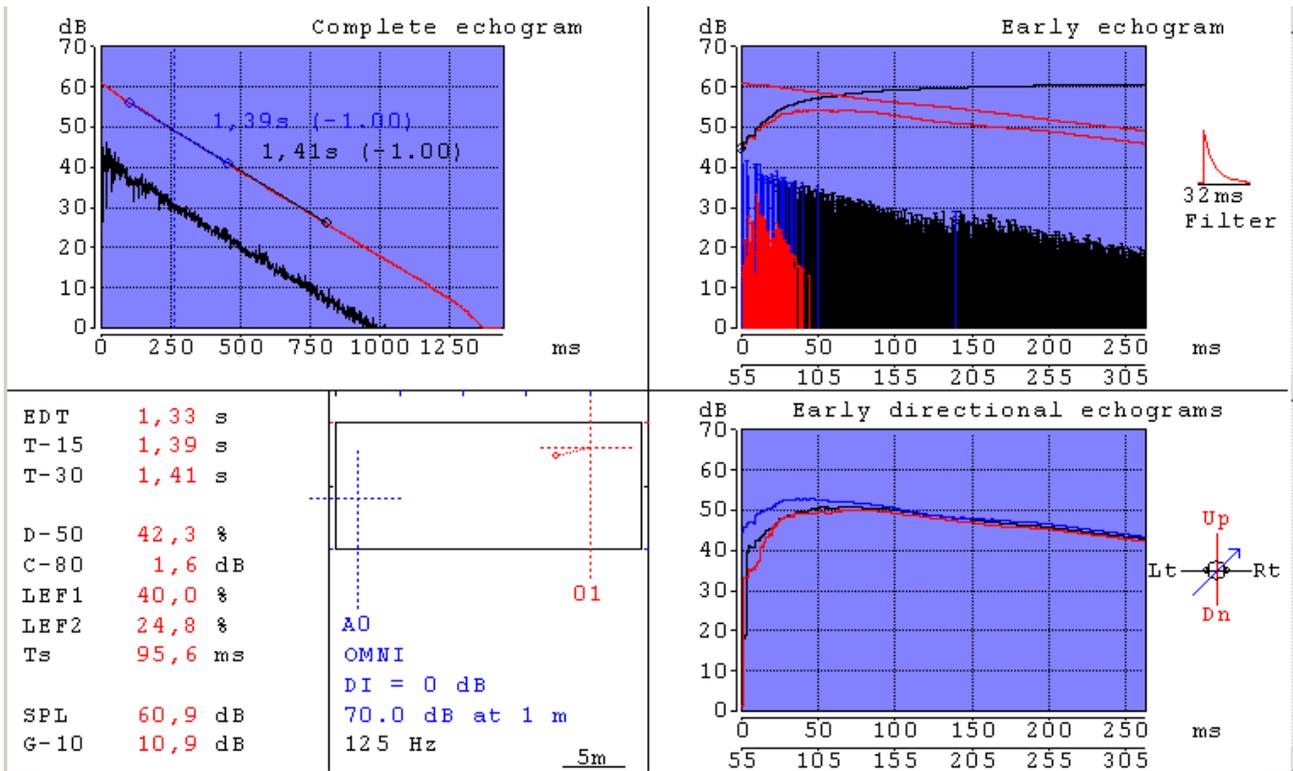


Figura 283: Curva di decadimento, Ecogramma e parametri oggettivi calcolati a 125 Hz

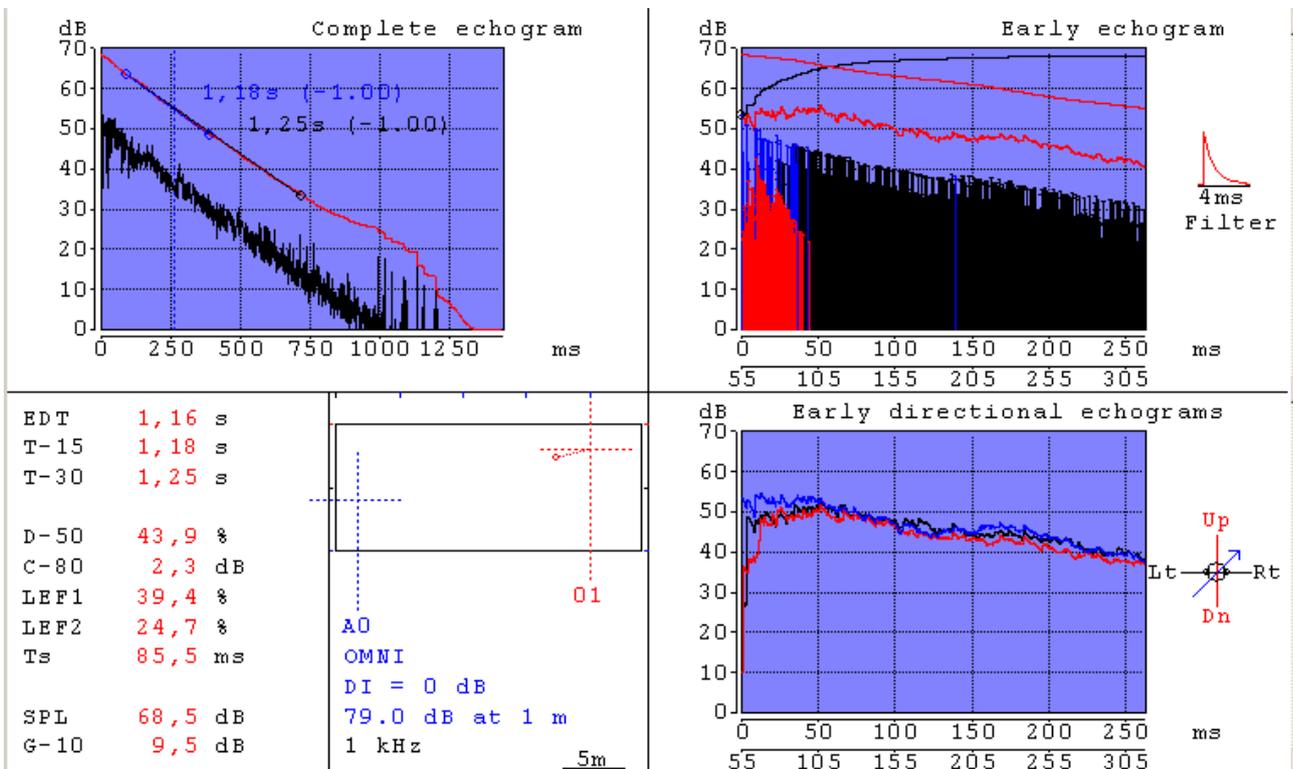


Figura 284: Curva di decadimento, Ecogramma e parametri oggettivi calcolati a 1000 Hz

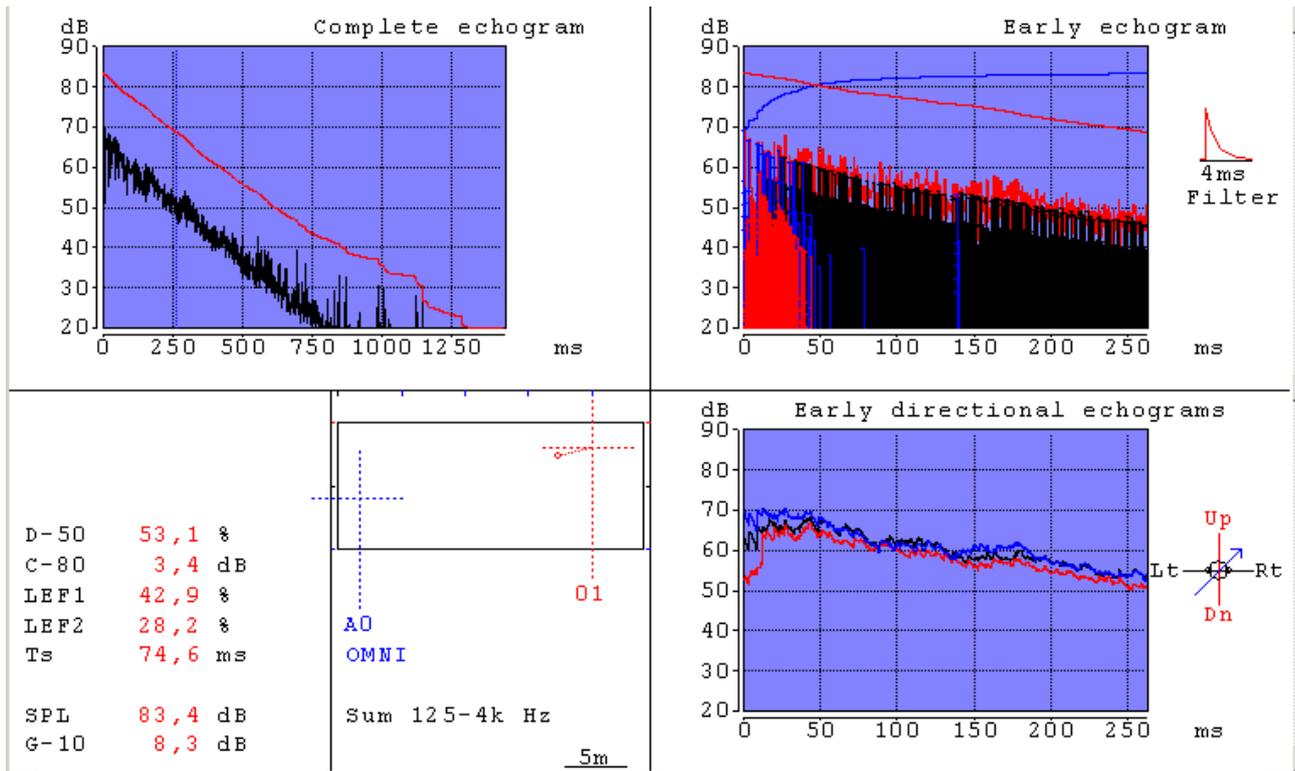


Figura 285: Curva di decadimento, Ecogramma e parametri oggettivi calcolati per tutte le bande

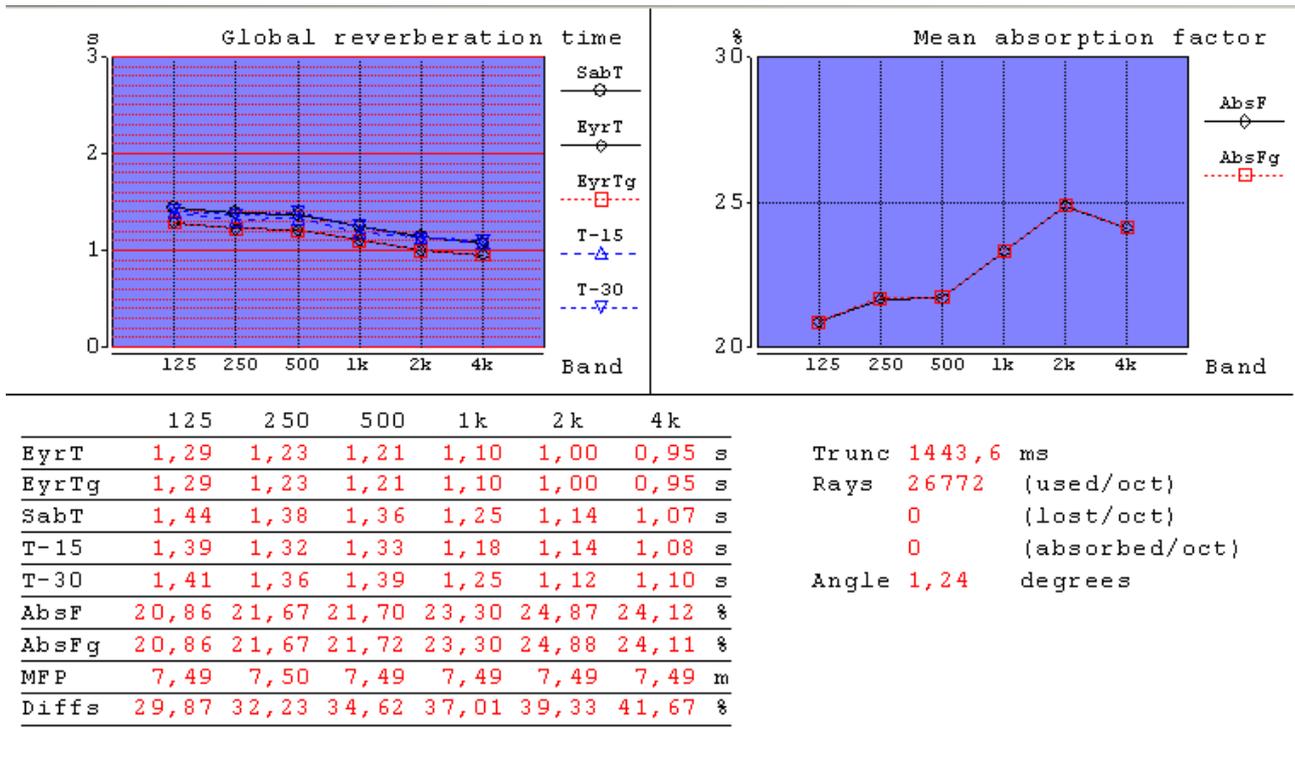


Figura 286: Parametri oggetti calcolati

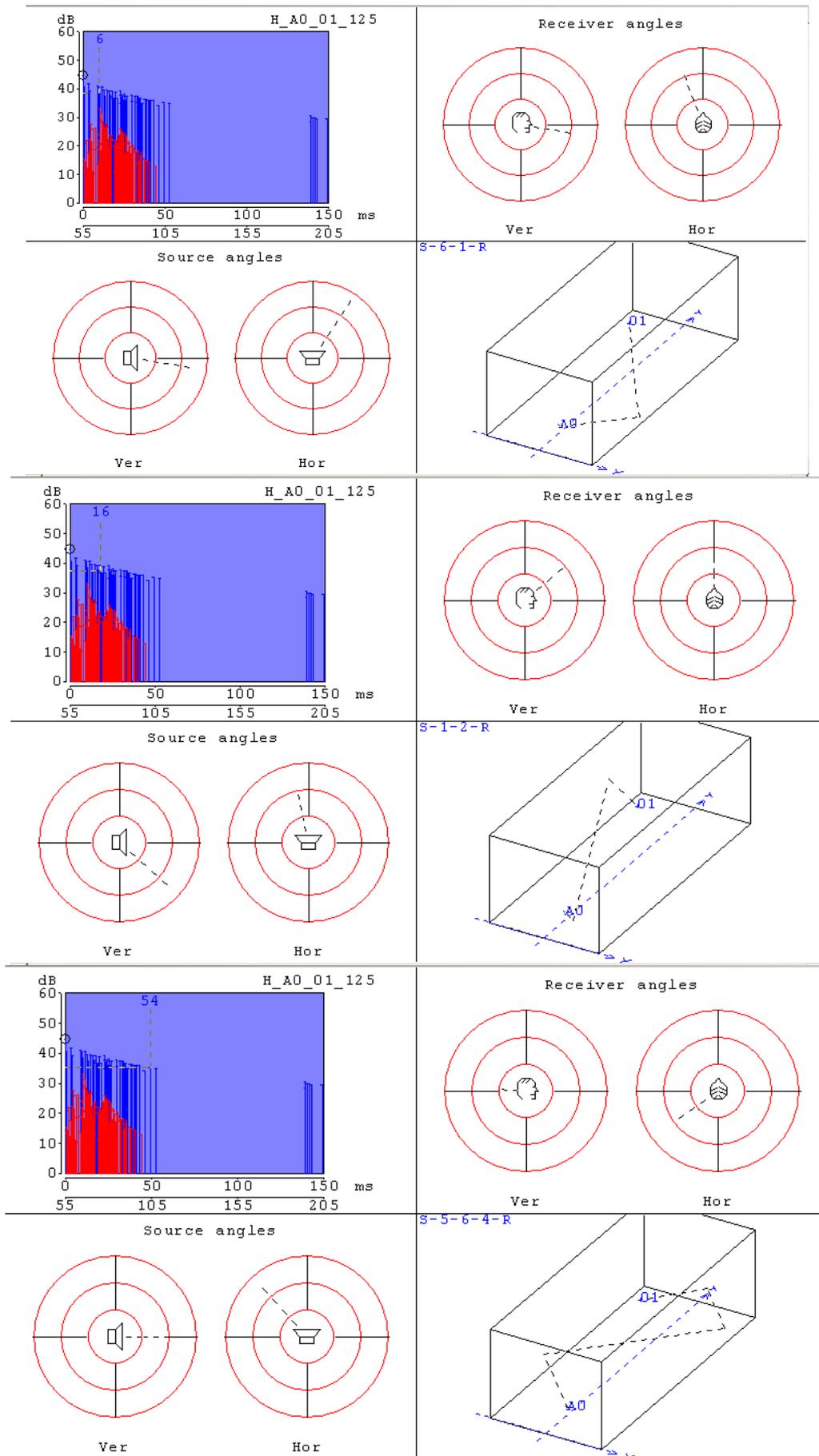


Figura 287: Reflectogrammi e percorsi delle onde riflesse

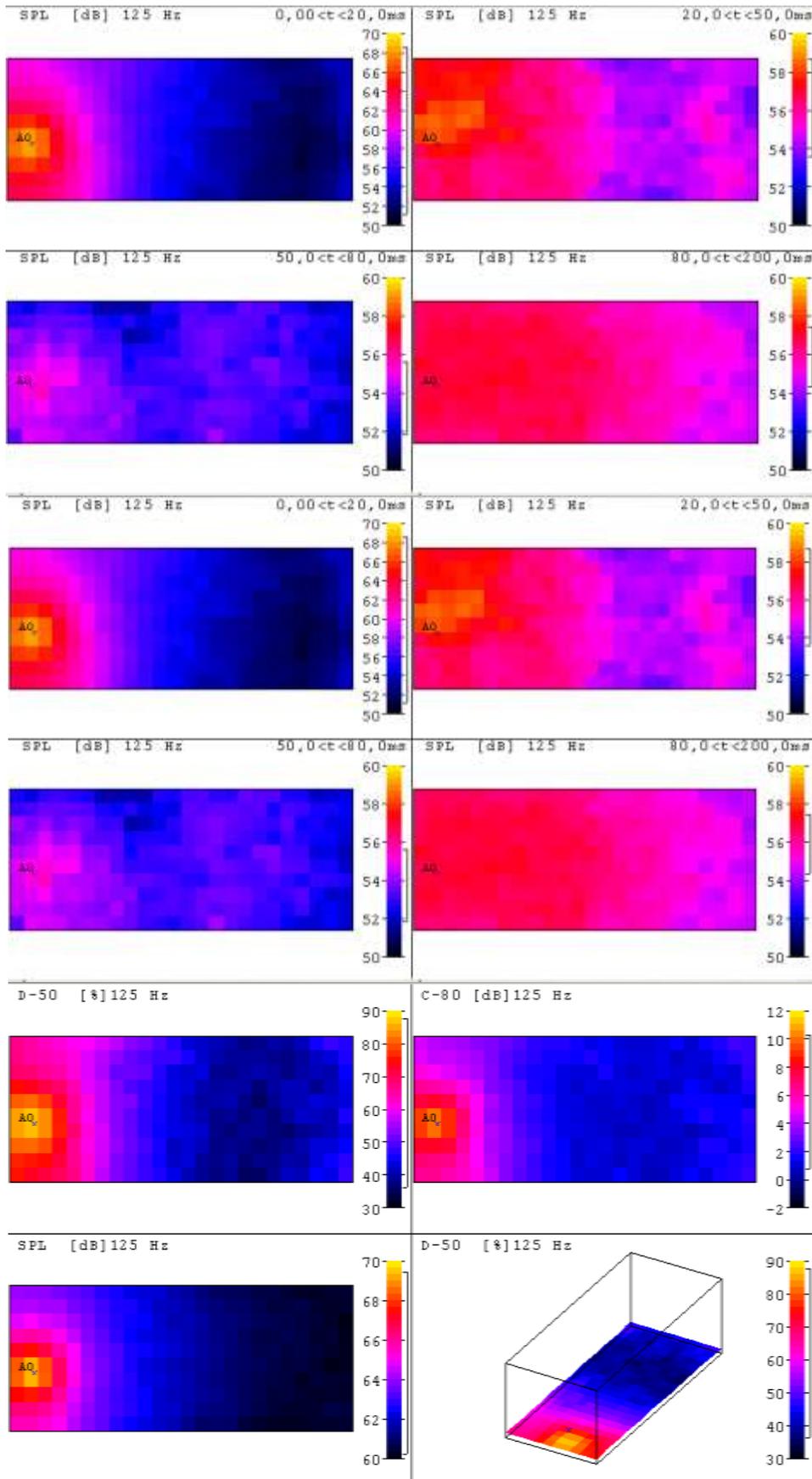


Figura 288: Distribuzione di alcuni parametri oggettivi

### 13.24.3. INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

Quando si utilizza un software di simulazione, quale certamente è un CAD acustico, occorre sempre ricordare che i risultati ottenuti sono frutto dell'applicazioni di algoritmi di calcolo che spesso non corrispondono perfettamente alla realtà. Il miglior simulatore della realtà è la stessa realtà.

I CAD acustici cercano di risolvere la complessità dell'evoluzione dell'acustica all'interno di una sala mediante metodi analitici (ISM, Ray tracing, ...) che rappresentano solo una metafora dell'evoluzione reale e pertanto ogni algoritmo comporterà sempre il raggiungimento di determinati risultati e la perdita di altri (effetti collaterali).

Occorre sempre interpretare i risultati sapendo cogliere in essi ciò che di certo possono indicarci evitando di considerare il computer come una sorta di deus ex machina che ci fornisce tabelle e diagrammi sempre esatti.

In pratica occorre possedere il processo della progettazione, senza timori riverenziali verso gli strumenti utilizzati, per quanto sofisticati possano essere. L'ipse dixit può portare ad avere errori grossolani.

In pratica quando ci si accinge ad usare un CAD acustico non occorre mai dimenticare che **siamo noi i progettisti e non il computer**.

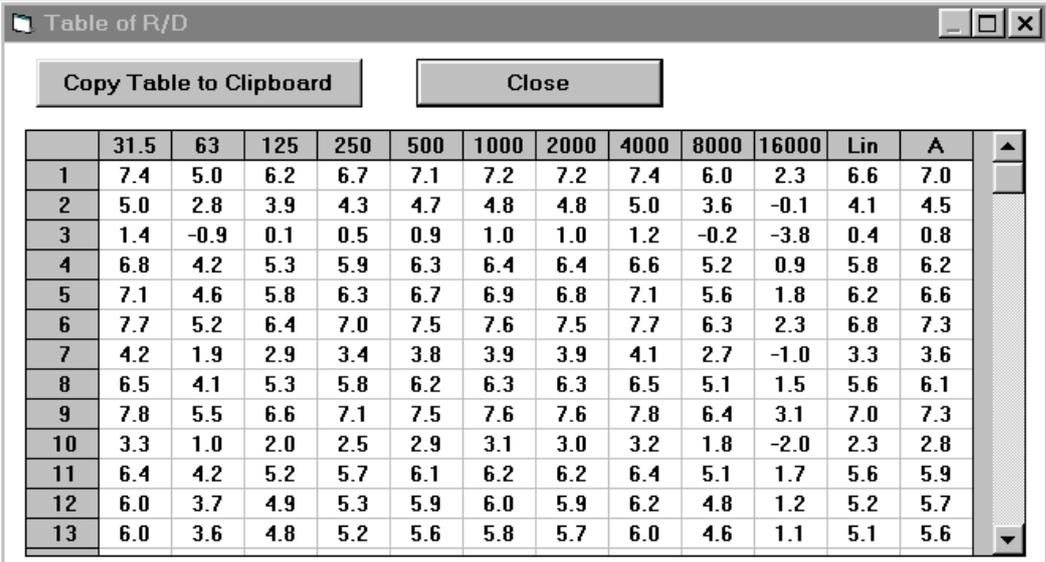
E soprattutto occorre sgombrare la mente dalla tendenza a considerare i valori ottenuti come assoluti e imm modificabili. Inoltre è bene evitare la forma mentis del farmacista: qualunque CAD fornisce sempre risultati **approssimati**!

E l'approssimazione dipende non solo dalla qualità degli algoritmi utilizzati (e quindi dal software) ma anche dai dati forniti, dalla correttezza delle scelte progettuali e dalla bontà delle proprietà dei materiali utilizzati.

### 13.24.4. STRUMENTI DI VALUTAZIONE

La complessità di calcolo dei descrittori oggettivi richiede strumenti di misura e di valutazione complessi.

I CAD acustici riescono a prevedere tali descrittori utilizzando tecniche di calcolo sofisticate che possiamo ritenere ben consolidate ed affidabili.



	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	Lin	A
1	7.4	5.0	6.2	6.7	7.1	7.2	7.2	7.4	6.0	2.3	6.6	7.0
2	5.0	2.8	3.9	4.3	4.7	4.8	4.8	5.0	3.6	-0.1	4.1	4.5
3	1.4	-0.9	0.1	0.5	0.9	1.0	1.0	1.2	-0.2	-3.8	0.4	0.8
4	6.8	4.2	5.3	5.9	6.3	6.4	6.4	6.6	5.2	0.9	5.8	6.2
5	7.1	4.6	5.8	6.3	6.7	6.9	6.8	7.1	5.6	1.8	6.2	6.6
6	7.7	5.2	6.4	7.0	7.5	7.6	7.5	7.7	6.3	2.3	6.8	7.3
7	4.2	1.9	2.9	3.4	3.8	3.9	3.9	4.1	2.7	-1.0	3.3	3.6
8	6.5	4.1	5.3	5.8	6.2	6.3	6.3	6.5	5.1	1.5	5.6	6.1
9	7.8	5.5	6.6	7.1	7.5	7.6	7.6	7.8	6.4	3.1	7.0	7.3
10	3.3	1.0	2.0	2.5	2.9	3.1	3.0	3.2	1.8	-2.0	2.3	2.8
11	6.4	4.2	5.2	5.7	6.1	6.2	6.2	6.4	5.1	1.7	5.6	5.9
12	6.0	3.7	4.9	5.3	5.9	6.0	5.9	6.2	4.8	1.2	5.2	5.7
13	6.0	3.6	4.8	5.2	5.6	5.8	5.7	6.0	4.6	1.1	5.1	5.6

Figura 289: Calcolo di RT nei vari punti di ascolto

Gli strumenti di misura dei parametri oggettivi non sono sempre facilmente reperibili commercialmente. Spesso occorre utilizzare catene di misura complesse e poi effettuare calcoli pesanti in laboratorio. In figura è dato un esempio di tabella di calcolo di uno strumento commerciale che rileva, mediante trasformate di Hadamard, la risposta impulsiva di una sala già costruita e da questa calcola gli indici qui elencati.

Questo strumento risulta utilissimo in fase di collaudo o di correzione mirata dell'acustica di una sala esistente.

System	Measurement	Analysis	Configuration	19:24:31			
C:\01DB\TEATRIN\PDAP04.FIL							
PADOVA POLLINI 5° F 2° SETTORE CENTRO FILA							
Sequence order = 13				Sampling frequency = 16 kHz			
RASTI = 0.53				STI = 0.54			
Octave Hz	RT60 s	EDT s	C80 dB	D50 %	S/N dB	E1000 dB	Noise substr.
125	* 0.67	1.27	-4.67	14.16	-6.74	-8.6	YES
250	* 0.81	1.22	-0.51	35.99	-1.47	-5.4	YES
500	* 0.64	1.13	-1.43	25.80	-3.16	-4.4	YES
1 k	* 0.77	1.35	-1.27	31.23	-2.97	0.0	YES
2 k	* 0.75	1.21	1.41	52.51	0.77	3.5	YES
4 k	* 0.78	0.94	2.61	60.49	2.44	-2.1	YES
ENTER Curves F3 Noise substr. YES/NO F6 Print F7 Metafile							
dBIMPULS - ROOMS ACOUSTICS - ver. 2.5 F1 HELP F2 KEYS							

Figura 290: Esempio di calcolo automatico di descrittori oggettivi

### 13.25. STRUMENTI VIRTUALI PER L'ACUSTICA DELLE SALE

Per superare le notevoli difficoltà di calcolo degli indici oggettivi già illustrati si possono utilizzare anche strumenti software che elaborano i segnali acustici acquisiti in tempo reale secondo algoritmi selezionati dall'utente. Essi sono una sorta di strumenti che esistono solo a video allorquando sono attivati e prendono il nome di strumenti virtuali.

In figura è raffigurato uno strumento virtuale appositamente studiato per il calcolo degli indici oggettivi delle sale. Ciò che appare sullo schermo rassomiglia al display di un ipotetico strumento elettronico che visualizza la risposta impulsiva, lo spettrogramma lineare e logaritmico e calcola automaticamente gli indici RT, D50, C80, S/N, RASTI ed altri ancora.

In successive schermate lo strumento virtuale può visualizzare i parametri calcolati in funzione della distribuzione spettrale per bande di ottava. Nell'esempio sotto riportato si hanno gli indici RT, EDT, C80, D50, R, Tc, S/N, E1000 alle varie frequenze di centro banda, oltre che il RASTI e lo STI del segnale elaborato.

Nelle due figure seguenti si riportano due esempi di costruzione dello strumento virtuale: nei riquadri a sinistra di ciascuna figura vi sono le rappresentazioni esterne (display) mentre nei riquadri a destra si ha l'implementazione delle funzioni visualizzate secondo la metafora dei circuiti elettronici.

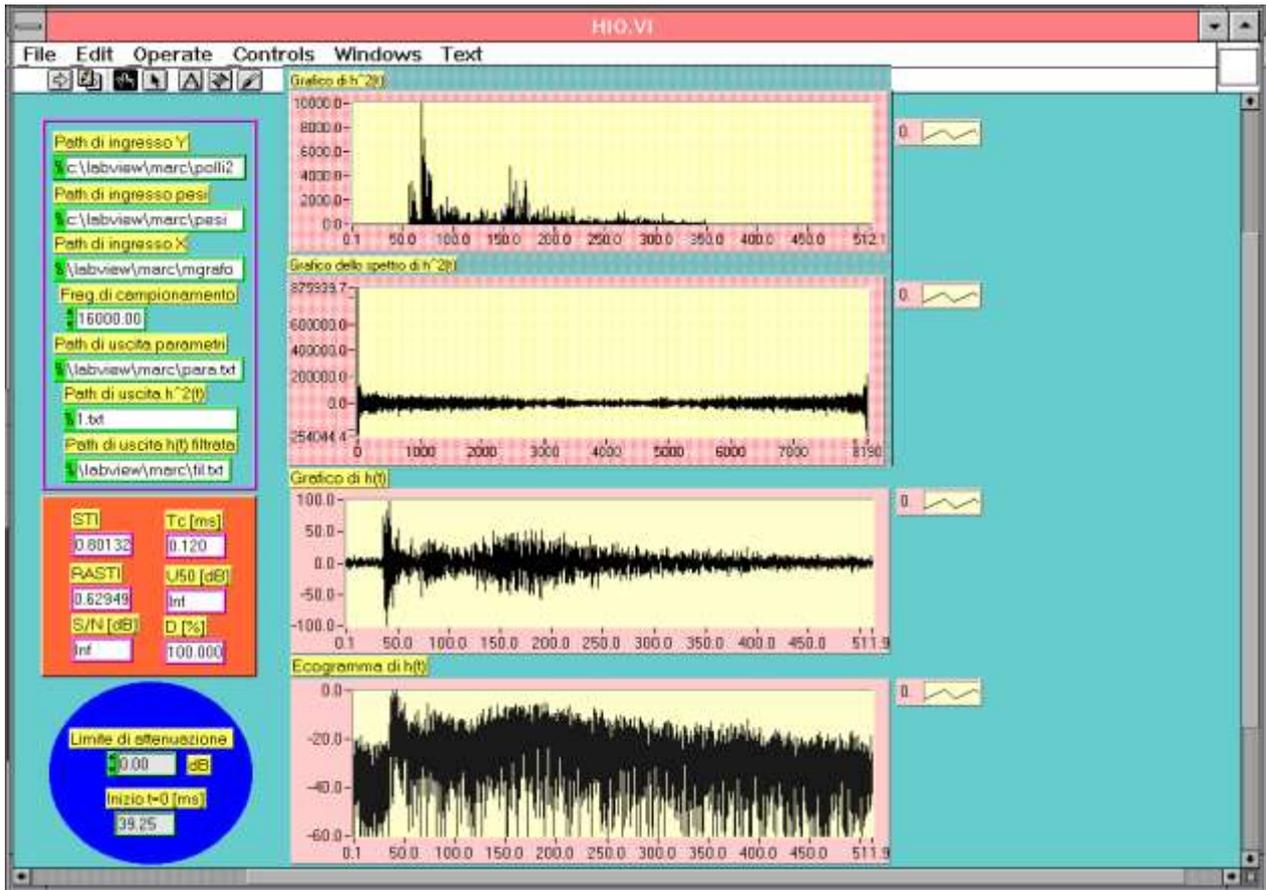


Figura 291: Esempio di strumento virtuale per la risposta impulsiva

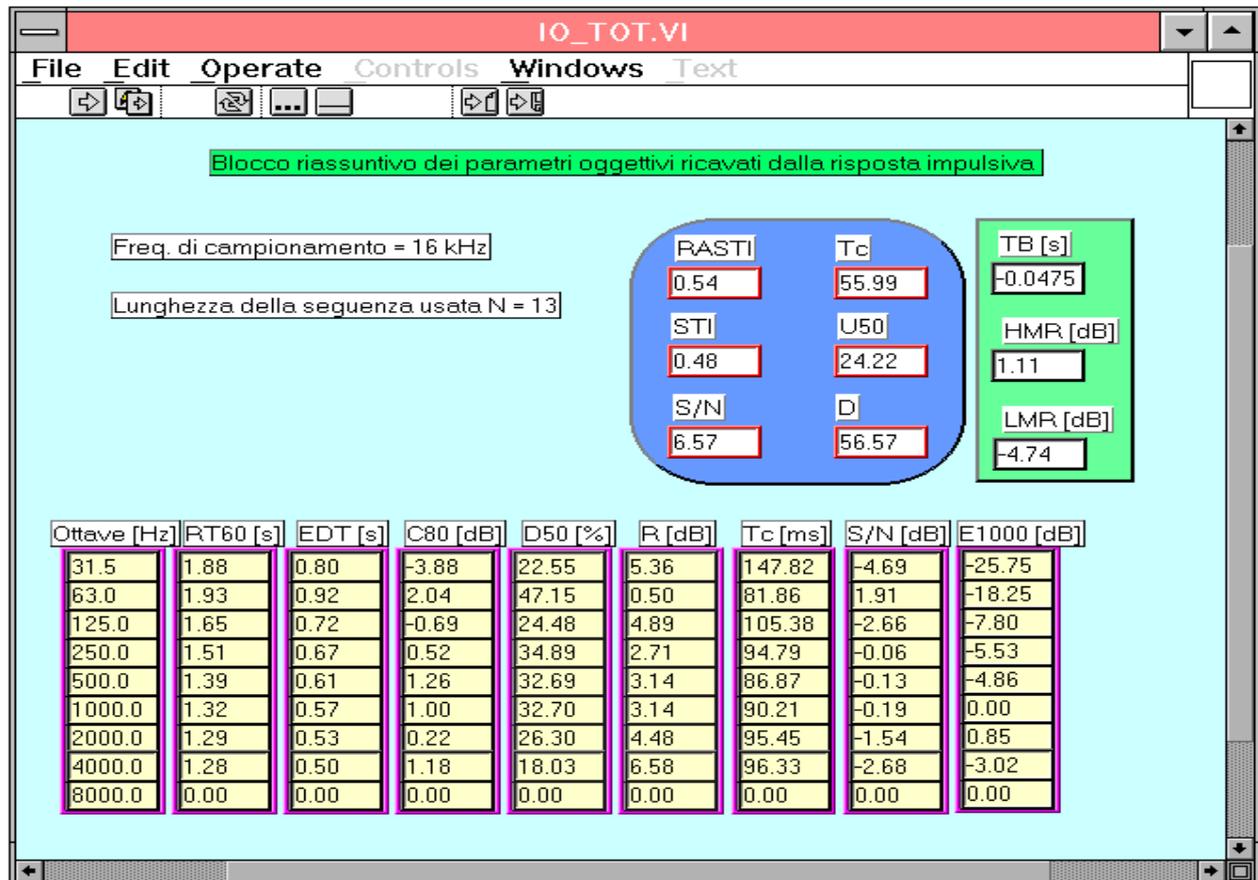


Figura 292: Calcolo dei descrittori oggettivi con lo strumento virtuale

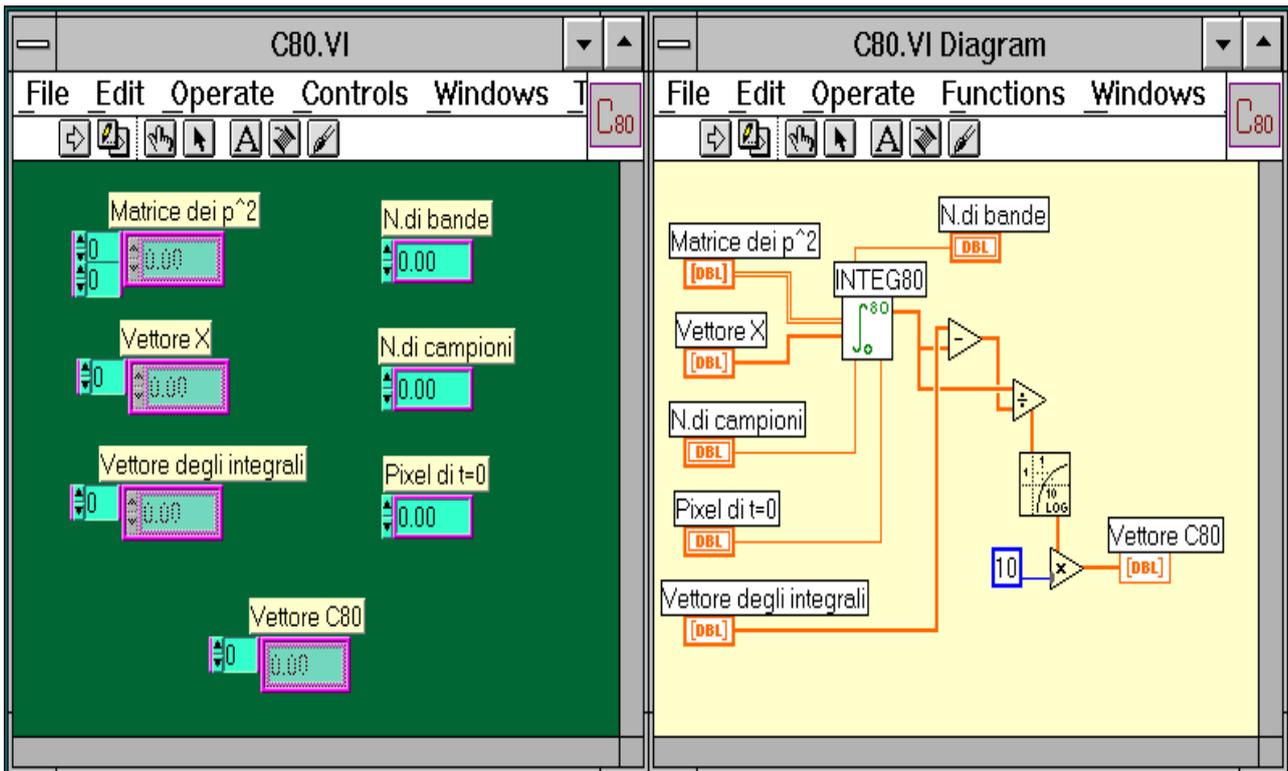


Figura 293: Costruzione dello strumento virtuale

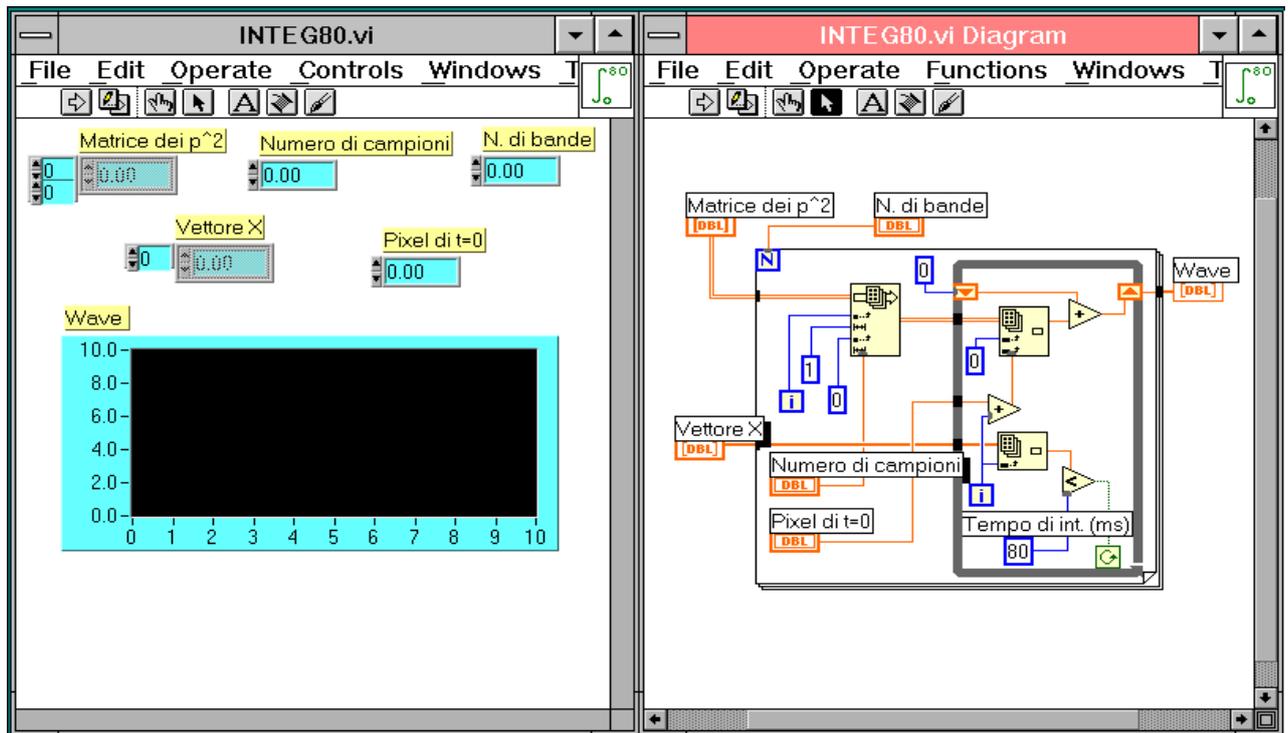


Figura 294: Altro esempio di costruzione dello strumento virtuale

## 13.26. LABORATORIO VIRTUALE DI ACUSTICA LA.V.A.®

Nell'ambito della mia attività di ricerca nel campo dell'Acustica delle Sale è stato progettato e costruito uno strumento *virtuale* capace di effettuare tutte le operazioni necessarie per pervenire ai indicati parametri acustici oggettivi visti in precedenza.

Detto strumento si può considerarlo come un vero e proprio *acustometro* ed è costituito essenzialmente da una serie di dispositivi elettronici ed elettroacustici comandati da un programma di gestione e di visualizzazione dei risultati che appare come un normale strumento hardware ma che in realtà è solo di tipo virtuale essendo un normale software specialistico e dedicato alla rilevazione delle grandezze desiderate.

La gerarchia dello strumento, denominato *LA.V.A. (Laboratorio Virtuale Acustica)*, è riportata nella seguente Figura 295. Ciascuno dei quadratini è un sottoprogramma che effettua una serie di operazioni (hardware e/o software) per il raggiungimento del risultato.

Non si vuole qui descrivere ogni dettaglio dello strumento *LA.V.A.* perché al di fuori degli scopi del presente corso. E' opportuno dire che la sequenza di operazioni è alquanto complessa sia per le operazioni fisiche da realizzare che per il complesso fisico – matematico utilizzato.

Ciascuno dei parametri acustici da rilevare (*RT, EDT, T30, D50, C809, Tc, S/N, STI, RASTI*) può essere calcolato dalla *risposta impulsiva* della sala cioè dalla risposta acustica ad uno stimolo dato da un segnale del tipo di *Delta* di Dirac.

Un tale segnale non esiste fisicamente e lo si realizza approssimandolo ad un segnale intenso e rapido quale uno sparo, una scarica elettrica, un battito di mani, ...

Si tratta in ogni caso di segnali solo di breve durata ma non impulsivi poiché questi ultimi sono di durata nulla.

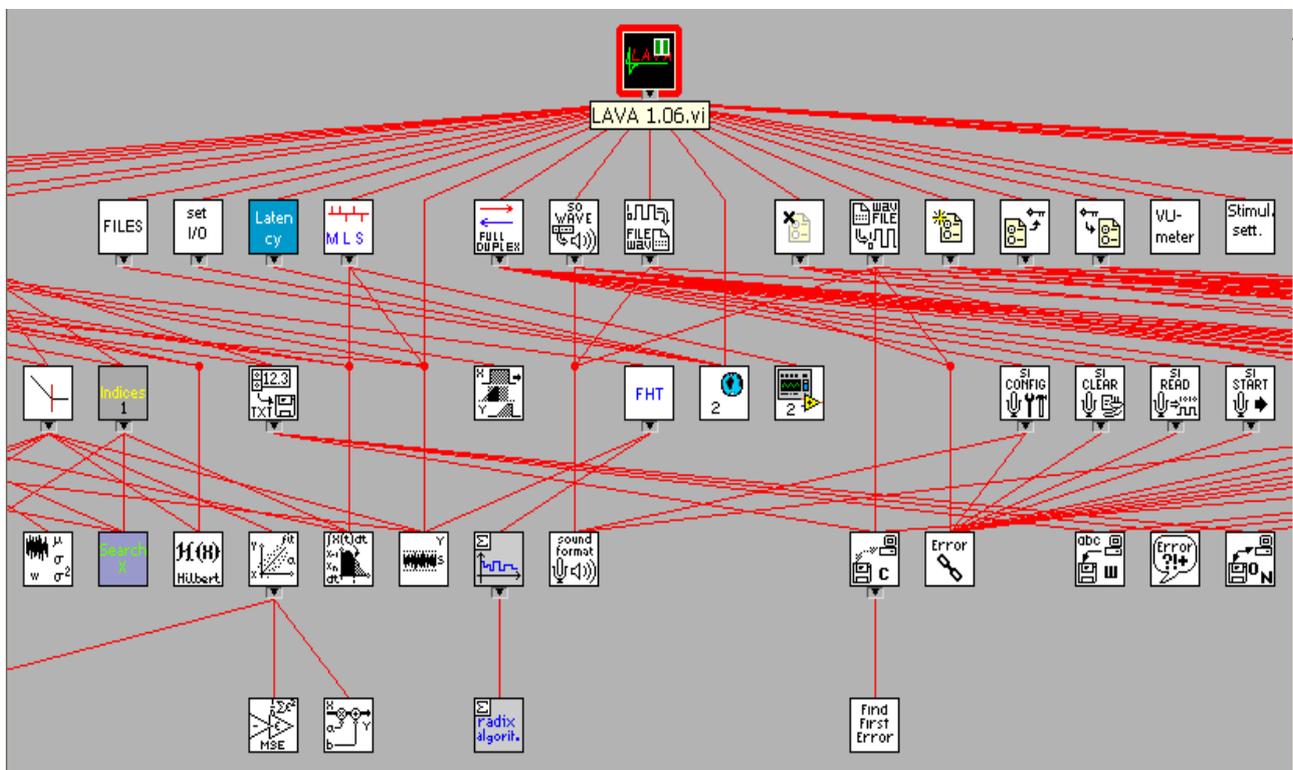


Figura 295: Gerarchia dello strumento virtuale LA.V.A.

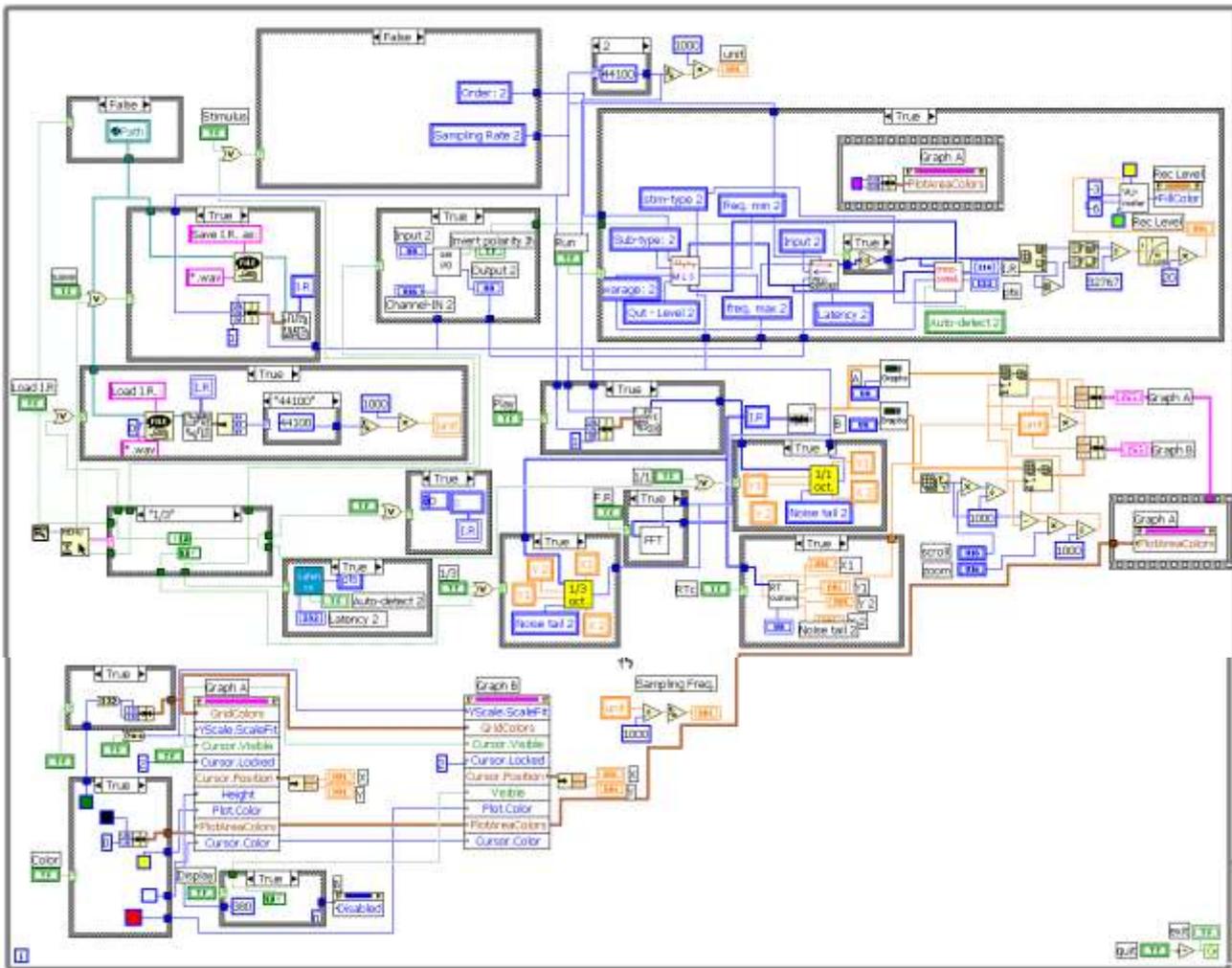


Figura 296: Definizione dello strumento virtuale con il linguaggio grafico G.

Si sono sviluppati in questi ultimi decenni alcune metodologie che consentono di ottenere la risposta impulsiva della sala senza utilizzare l'impulso come segnale di eccitazione. Queste tecniche si basano su complesse teorie matematiche ed essenzialmente fanno uso di segnali noti (ma non impulsivi) la cui trasformata inversa è nota e quindi può essere facilmente sottratta alla risposta complessiva della sala con metodologie di deconvoluzione matematica.

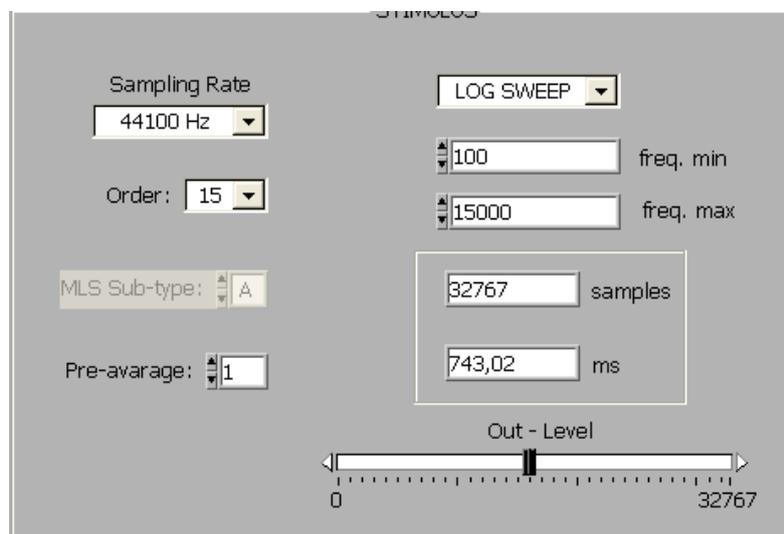


Figura 297: Selezione della metodologia LOG SWEEP

Una di queste tecniche fa uso delle *Sequenze di Massima Lunghezza*, dette *MLS*, che sono costituiti da segnali casuali formati da sequenze digitali di zero e di uno opportunamente predisposte (ordine). Un'altra tecnica consiste nell'uso di segnali sinusoidali (*armoniche*) di frequenza variabile in modo lineare o in modo logaritmico. Lo strumento virtuale *LA.V.A.* implementa tutte queste metodologie che sono scelte dall'operatore di volta in volta, come indicato in Figura 297 per la selezione del metodo LOG SWEEP che si è dimostrato più affidabile perché meno soggetto al rumore di misura esterno.

Le principali sequenze operative che *LA.V.A.* esegue sono qui elencate:

- Generazione del segnale di eccitazione (*MLS* o *SWEEP*);
- Ricezione del segnale con microfono posto in un punto della sala;
- Calcolo della risposta impulsiva nel punto della sala;
- Calcolo dell'integrale inverso di Schröder;
- Calcolo dei parametri acustici (*RT*, *EDT*, *T30*, *D50*, *C80*, *Tc*, *S/N*,);
- Generazione delle funzioni di eccitazione a bassa frequenza;
- Calcolo dell'STI e del RASTI;
- Visualizzazione dei risultati.

### Catena di rilevazione

Per l'eccitazione della sala e il rilevamento delle risposte nei vari punti di misura si utilizza una catena di rilevazione costituita da:

- Un computer portatile nel quale è stato caricato il software *LA.V.A.*;
- Un box acustico (*EXTIGY*<sup>®</sup>) avente una dinamica *S/N* di 96 dB a 24 bit;
- Un microfono portatile a radioonde;
- Un ricevitore per radio onde;
- Un amplificatore di potenza;
- Una cassa acustica (sorgente) formata da 12 altoparlanti posti su un dodecaedro;
- Cavi schermati di alimentazione.

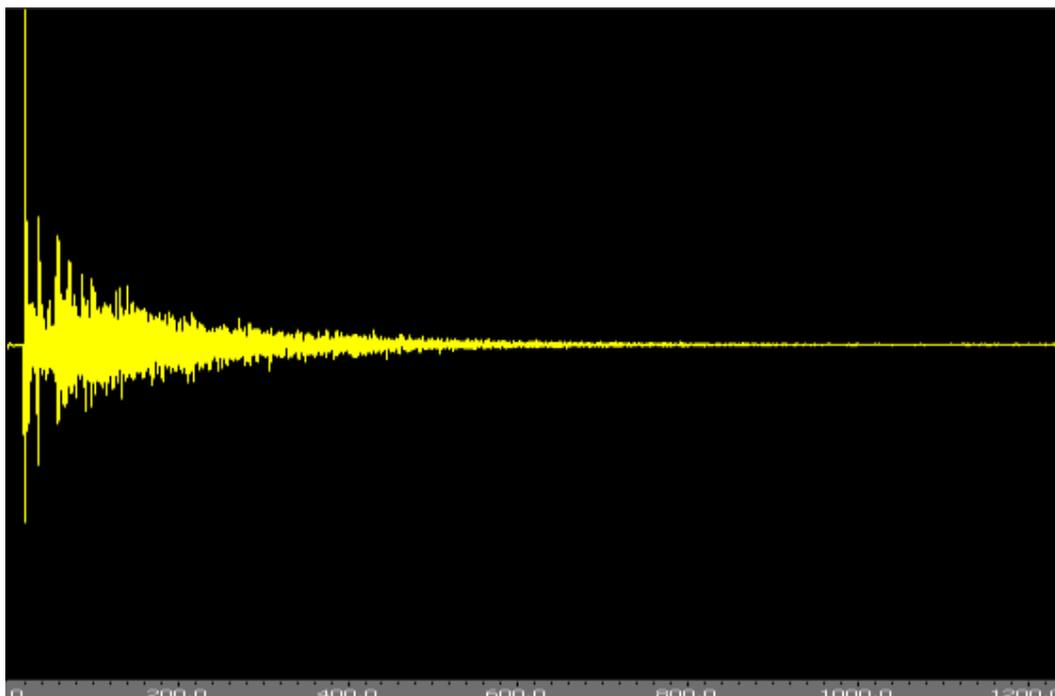


Figura 298: Oscillogramma della risposta impulsiva

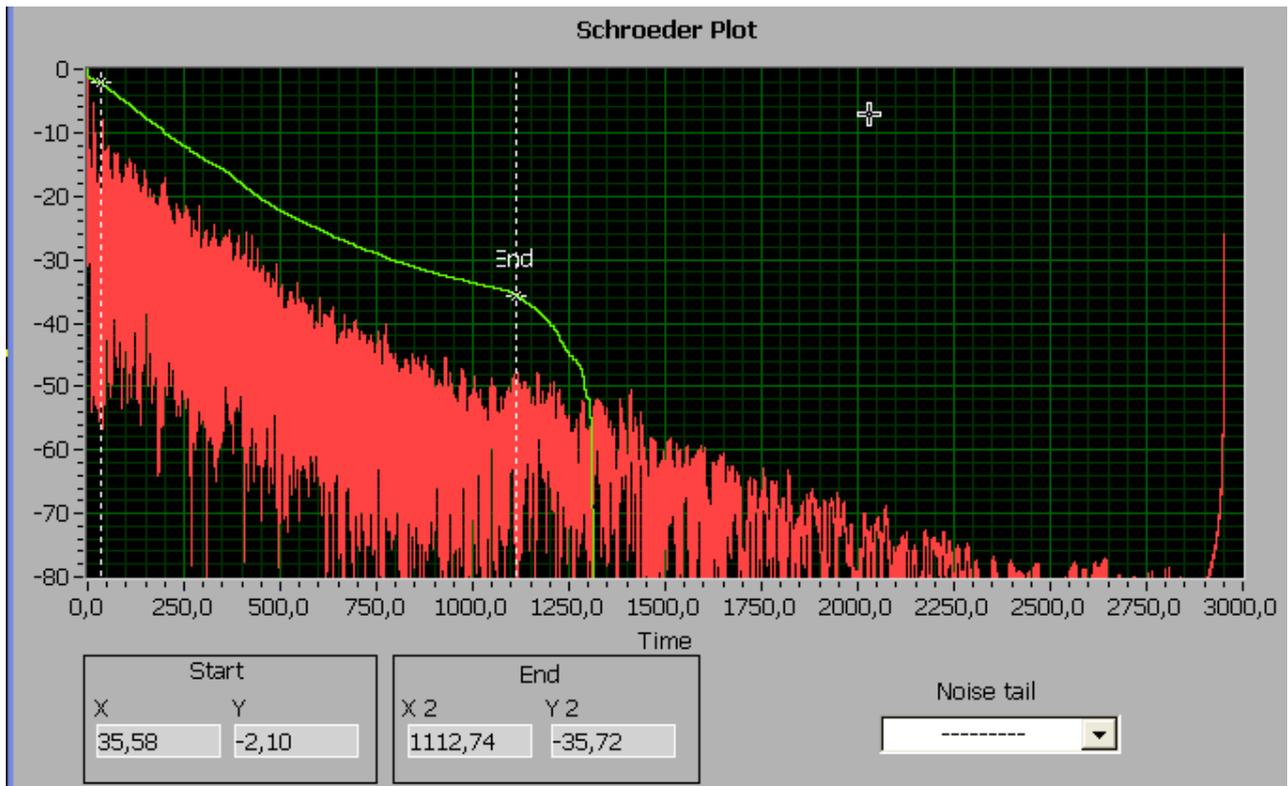


Figura 299: Integrale di Schröder

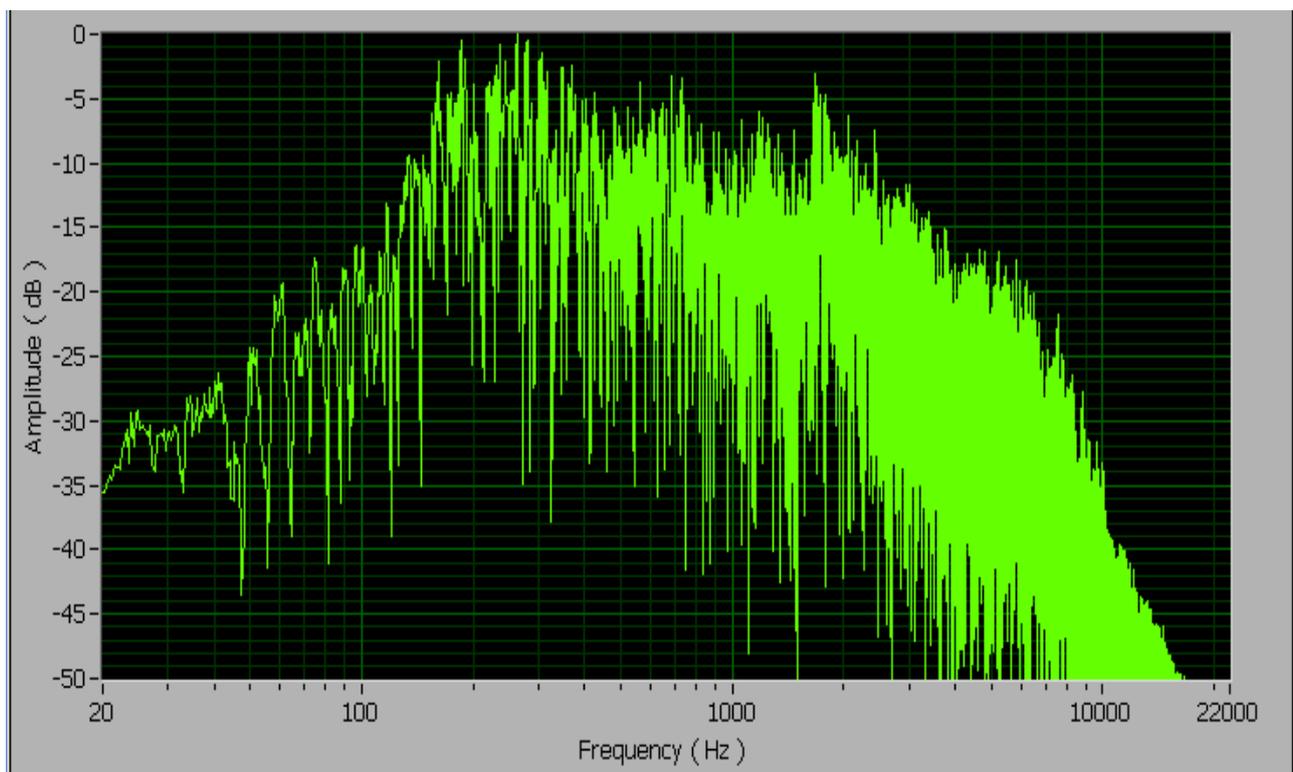


Figura 300: Risposta FFT calcolata da LA.V.A.

### Procedura di misura

Il calcolo dei parametri acustici è stato effettuato ponendo la sorgente sul palco (in corrispondenza del boccascena o all'interno) e il microfono in vari punti della sala e della galleria.

La risposta acustica in ciascun punto è archiviata nel computer in modo da poter effettuare i calcoli dei parametri acustici sia immediatamente che in elaborazione batch.

Nelle figure si hanno alcuni esempi del funzionamento dello strumento virtuale LA.V.A e in particolare della risposta impulsiva (oscillogramma lineare e logaritmico), dello spettro FFT calcolato, dell'integrale inverso di Schroeder con la possibilità di fissare gli estremi di calcolo dei parametri acustici e della tabella finale dei calcoli dei parametri acustici oggettivi.

<i>1/1 oct.</i>	31.5 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	<b>WIDE</b>
RT20(s)	13,18	1,35	1,72	1,57	2,18	1,48	1,35	1,10	0,85	1,48
rRT20	-0,95	-0,99	-1,00	-0,99	-0,98	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
RT30(s)	10,49	4,78	2,85	2,17	3,23	1,78	1,52	1,11	0,80	2,00
rRT30	-0,88	-0,91	-0,96	-0,98	-0,96	-0,99	-1,00	-1,00	-1,00	-0,98
RTuser(s)	10,16	4,70	2,86	2,15	3,07	1,76	1,48	1,11	0,80	1,95
rRTuser	-0,89	-0,90	-0,96	-0,98	-0,96	-0,99	-1,00	-1,00	-1,00	-0,98
EDT(s)	5,88	0,83	1,85	1,43	1,29	1,24	1,17	1,05	0,71	1,19
C50(dB)	-11,89	1,39	-4,48	-2,80	-1,93	-0,45	0,42	0,64	4,23	-0,37
C80(dB)	-4,40	4,62	-1,58	0,65	1,63	1,51	2,38	3,07	6,94	2,36
D50(%)	6,08	57,92	26,28	34,44	39,08	47,43	52,42	53,69	72,57	47,85
Tc(ms)	347,90	74,37	137,91	103,74	94,72	85,36	76,05	71,03	40,77	81,85
S/N(dB)	-5,78	4,81	-2,13	0,31	1,83	1,90	2,62	3,51	7,65	2,38
U50(dB)	NaN	8,05	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	14,94	8,50	NaN

Figura 301: Quadro dei risultati

## 14. IL LINGUAGGIO PARLATO

Tutto l'apparato uditivo si è sviluppato prevalentemente per il linguaggio parlato, primo strumento di comunicazione fra gli uomini. Questo linguaggio ha caratteristiche acustiche molto interessanti che oggi sono molto utilizzate per il riconoscimento delle voci (sistemi di riconoscimento vocale per usi bancari, per accesso ai computer, ...) e per una problematica di interesse giudiziario (riconoscimento del parlatore).

### 14.1. NATURA DEL LINGUAGGIO PARLATO

Si è già osservato che le esigenze acustiche per il linguaggio parlato non sono le stesse di quelle per la musica e quest'ultima si differenzia anche a seconda che sia sinfonica, operistica all'italiana o romantica wagneriana.

Capire il linguaggio parlato in una sala destinata alla musica è difficoltoso mentre ascoltare la musica in una sala teatrale predisposta per commedie e drammi genera la sensazione di mancanza di vitalità e la musica appare spenta. Molte cose si possono spiegare con il *tempo di riverberazione* che assume valori ottimali di 1 secondo per il parlato, 1.3 secondi per l'opera e 2 secondi e più per la musica sinfonica. Inoltre, come già visto nei capitoli precedenti, per la musica si hanno molti altri problemi che non possono essere affrontati e spiegati con il solo tempo di riverberazione.

Per il linguaggio parlato tutto è più semplice, per fortuna. Se si raggiunge l'*intelligibilità* delle parole e il rumore di fondo è basso rispetto al livello del parlato allora si hanno condizioni di buon ascolto solitamente apprezzate da tutti gli ascoltatori.

Le sale con *tempo di riverberazione* dell'ordine del secondo vanno bene per il parlato anche se questo solo requisito non soddisfa, come vedremo fra breve, la piena intelligibilità delle parole.

Molti teatri sono stati costruiti solo nel rispetto del primo requisito (tempo di riverberazione entro 1 secondo) trascurando l'altro (l'intelligibilità) forse per mancanza di conoscenze al riguardo<sup>1)</sup>.

Le specifiche acustiche da rispettare sono state per lungo tempo solamente quelle del tempo di riverberazione, buona visibilità, eliminazione di echi e riduzione del rumore di fondo. Per tali motivi la platea è sempre stata posta nelle immediate vicinanze del palco.

Oggi si pone molta attenzione anche alla riflessione immediata che sembra influenzata dalla tipologia del teatro e dalla sua geometria.

Nella sale con proscenio, nelle quali gli attori e il pubblico sono mutuamente affacciati, prevale il suono diretto che normalmente assicura una buona intelligibilità delle parole.

Nei teatri nei quali il pubblico può essere posto anche alle spalle degli attori si hanno seri problemi di intelligibilità e pertanto le superfici laterali debbono assicurare un elevato numero di riflessioni immediate. Inoltre in quest'ultimo tipo di teatro la distanza delle pareti è inferiore a quelli a proscenio proprio per favorire le riflessioni laterali immediate.

Al fine di affrontare in dettaglio le problematiche della progettazione acustica delle sale teatrali occorre capire bene le caratteristiche del linguaggio parlato anche alla luce delle recenti acquisizioni e degli studi effettuati su questo argomento.

#### 14.1.1. NATURA DEL LINGUAGGIO PARLATO

Il linguaggio parlato, qualunque sia la lingua, è formato da vocali e consonanti. Il suono vocale è determinato dall'aria che fluisce dai polmoni attraverso le corde vocali: esso interagisce con la gola, la bocca e il naso in modo da formare un suono caratteristico per ciascun individuo.

Il movimento della bocca, della lingua e delle labbra consente di ottenere diverse vocali che sono di intensità più elevata (circa 12 dB) rispetto alle consonanti.

Le consonanti sono costituite da suoni impulsivi vocalizzati e non vocalizzati che sono molto più silenziosi dei primi. Esse sono inoltre di durata apprezzabilmente inferiore alle vocali: solitamente le vocali hanno durata di circa 90 ms mentre le consonanti hanno durata tipica di 20 ms.

Le vocali trasmettono una maggiore energia rispetto alle consonanti e ciò penalizza molto queste ultime in spazi con tempi di riverberazione elevati e con riflessione ritardate.

Il linguaggio parlato interessa un ampio spettro di frequenza, da sotto i 125 Hz a oltre gli 8000 Hz, e la voce maschile ha frequenze basse in proporzione maggiore della voce femminile a causa di un'apertura più lunga delle corde vocali che produce una frequenza portante inferiore rispetto a quella femminile.

L'emissione del suono vocale da parte dell'uomo è direzionale alle medie ed alte frequenze ed omnidirezionale alle basse frequenze. Inoltre lo spettro della potenza acustica mostra un valore inferiore alle alte frequenze che non alle basse frequenze (250-500 Hz) e poiché le consonanti sono di alta frequenza essi trasmettono minore potenza delle vocali.

La potenza trasportata dalla voce umana è modesta, tipicamente dell'ordine di 0.1 mW, con valori maggiori nel caso di recitazione teatrale rispetto al parlare normale. Si tenga presente, inoltre, che la potenza acustica impegnata varia da individuo ad individuo.

---

<sup>27)</sup>La prima trattazione completa di quest'argomento risale a Moore nel 1964.

Negli spazi aperti e nei grandi teatri la direzionalità della voce umana riveste notevole importanza ed è particolarmente sfortunato il fatto che siano le alte frequenze, meno energetiche e più importanti per l'intelligibilità, ad essere le più direzionali.

### 14.1.2. EFFETTI DELLA DIREZIONALITÀ DEL LINGUAGGIO PARLATO

La direzionalità del parlato è conseguenza di due ragioni principali: le dimensioni piccole della bocca e la posizione della bocca nella testa. Le dimensioni della bocca sono piccole rispetto alle frequenze del linguaggio parlato mentre il mascheramento della testa sembra rivestire un ruolo importante.

Negli antichi teatri greci l'uso delle maschere favoriva l'amplificazione del suono emesso dagli attori come in un modesto megafono. Ma molto del beneficio prodotto dalle maschere sembra dovuto ad un incremento di direzionalità del suono prodotto. Da studi recenti si è visto che a 500 Hz l'energia predominante è quella delle vocali e questa cambia poco sia in posizione frontale che posteriore rispetto alla persona.

Ben diversa è la situazione per le consonanti: a 4 kHz l'energia maggiore è proprio dovuta ad esse e l'emissione dipende fortemente dalla posizione di ascolto (frontale o posteriore). Poiché l'intelligibilità dipende fortemente dalle alte frequenze (cioè dalle consonanti di breve durata) la minore potenza trasportata rende più problematico l'ascolto.

Per fortuna gli schermi di riflessione alle alte frequenze sono di dimensioni inferiori rispetto a quelle alle basse frequenze.

### 14.1.3. PROBLEMATICHE DEL PARLATO ALL'APERTO

In uno spazio aperto le condizioni acustiche sono dominate dalle onde sonore dirette che si attenuano in modo inversamente proporzionale al quadrato della distanza (assumendo una propagazione sferica). L'intelligibilità all'aperto è in gran parte funzione del rapporto fra il suono relativo al parlato e il rumore di fondo disturbante: è stato dimostrato che occorre avere un segnale utile di almeno 10 dB superiore al fondo perché si possa avere tale intelligibilità.

Se si fa in modo di far pervenire all'ascoltatore anche le riflessioni laterali immediate tale rapporto migliora. A tale scopo occorre porre attenzione a tutte le riflessioni che possono venire da superfici vicine alla sorgente, non importa se tali superfici sono laterali o al di sopra della sorgente.

I più famosi teatri all'aperto (e non solamente per la loro acustica) sono quelli antichi ed è interessante studiare in profondità l'acustica dei teatri greci che sembrano rispondere meglio del previsto alle aspettative. Knudsen ha misurato (1932) nel deserto del Mohave la distanza limite per la trasmissione del linguaggio parlato, in condizioni di quiete esterna e in assenza di vento, trovando il valore di 42 m nella direzione di fronte al parlatore, 30 m per la direzione laterale, 17 m per la direzione posteriore.

Ma allora come si giustifica la splendida acustica nel Teatro di Epidauro ove le distanze arrivano fino a 70 dalla sorgente? E' possibile pensare che le riflessioni immediate siano responsabili di questo straordinario risultato?

Nel 1932 G. Lyon condusse un esperimento nella *Salle Pleyel* di Parigi: due osservatori furono sospesi sotto piccoli palloni che potevano essere spostati liberamente e indipendentemente.

Quando questi erano tenuti ad una distanza di 11m il suono appariva molto confuso mentre durante la notte, al di sopra di una superficie acquosa, una voce normale poteva essere ascoltata

ad un miglio di distanza. Lyon concluse che per trasmettere il suono occorre le riflessioni acustiche.

L'osservazione di Lyon era corretta anche se un po' sovrastimata. Nel primo caso la distanza di trasmissione era determinata da un non meglio specificato rumore di fondo, altrimenti egli avrebbe dovuto ottenere la stessa distanza massima di 42 m determinata da Knudsen. Nel secondo caso (specchio d'acqua sottostante) la trasmissione sembra sia stata migliorata da effetti di gradienti di temperatura verticali dell'aria.

L'effetto reale delle riflessioni immediate è quello di accrescere per semplice addizione l'energia del suono diretto.

Nel caso di una singola riflessione dovuta ad una superficie solida sottostante l'incremento è di 3 dB e poiché il livello sonoro si riduce di 6 dB per ogni raddoppio della distanza, l'effetto della riflessione è di accrescere la distanza limite per un ascolto soddisfacente di un fattore  $\sqrt{2}$ .

Pertanto nei teatri greci la presenza di superfici solide riflettenti al di fuori della regione circolare (*orchestra*) portava la distanza massima da 42 m a  $42 \times 1.4 = 60$  m.

Se a queste riflessioni si aggiungono quelle delle pareti posteriori e l'amplificazione creata dalla maschera di recitazione è realistico pensare che la distanza di 70 m possa essere raggiunta con successo.

Naturalmente perché questo risultato possa considerarsi valido occorre avere un rumore di fondo bassissimo e ciò pare garantito negli antichi teatri greci soprattutto per la posizione topologica nella quale venivano posti<sup>1)</sup>.

#### 14.1.4. PROBLEMATICHE DEL PARLATO NELLE SALE CHIUSE

Si è visto come nel caso della musica prevalga una situazione multidimensionale a livello soggettivo e i requisiti progettuali delle sale musicali debbono rispondere a tutte le caratteristiche soggettive già esaminate.

L'incremento della riverberazione accompagnata da una perdita di intimità<sup>1)</sup>, rende generalmente il progetto delle sale musicali un lavoro delicato di bilanciamento fra le varie esigenze geometriche ed acustiche. Ci chiediamo se anche per il linguaggio parlato si abbiano problemi simili alle sale musicali e se occorre bilanciare l'*intimità* e gli attributi di spazialità con la qualità della voce. Una ricerca condotta nel 1986 da M. Barron in alcuni teatri inglesi ha portato all'individuazione dei seguenti parametri come fondamentali per il parlato:

- *l'intelligibilità* (inclusa la facilità di ascolto);
- *l'intimità*;
- *la riverberazione*.

In particolare solo l'intelligibilità è stata giudicata molto importante per un buon giudizio acustico nel senso che le persone intervistate hanno detto di ritenere necessarie l'intimità e la riverberazione ma sono stati piuttosto imprecisi sull'entità di questi parametri, mentre sono stati più precisi sull'intelligibilità. Questa ricerca ha anche dimostrato che laddove non si può garantire l'intelligibilità del linguaggio allora è proprio quest'ultima il maggior vincolo.

Secondo altre ricerche (Latham e Newman, 1982) mostrano che le caratteristiche spaziali del suono o la presenza di riflessioni laterali immediate sono poco rilevanti per il parlato. Il requisito

---

<sup>28)</sup>Il teatro greco veniva posto in posizione isolata dall'agora in una posizione elevata.

<sup>29)</sup>L'*intimità* è legata alle riflessioni laterali immediate della sala.

della buona intelligibilità è oggi divenuto l'obiettivo primario da raggiungere nella buona progettazione di sale teatrali per linguaggio parlato. Anche all'interno di sale teatrali la trasmissione del suono è influenzata dal rapporto segnale/rumore, come nel caso di trasmissione all'aperto: ad esempio, un impianto di ventilazione rumoroso può rendere incomprensibili le parole.

Occorre però considerare anche le caratteristiche riflesse delle pareti di una sala poiché esse possono provocare non solo riflessioni immediate (che migliorano l'ascolto del parlato) ma anche riflessioni ritardate che influenzano negativamente la comprensibilità del linguaggio.

Nella situazione limite di una cattedrale con grandi tempi di riverberazione, le riflessioni ritardate rendono il linguaggio incomprensibile tranne che a breve distanza dal parlatore.

Dall'altro lato nel caso di piccoli ambienti, come le stanze di un'abitazione domestica, con tempi di riverberazione tipici di 0.5 secondi, si hanno riflessioni laterali ritardate troppo deboli per potere influenzare le condizioni di ascolto. Inoltre le riflessioni laterali immediate sono talmente numerose da rendere quasi ininfluenza l'orientamento del parlatore rispetto all'ascoltatore.

Il *tempo di riverberazione* è quindi un elemento determinante per l'intelligibilità del linguaggio ma non è il solo.

Un metodo per determinare il livello di intelligibilità è quello di far leggere ad uno speaker alcune sillabe senza senso (del tipo consonante-vocale-consonante) e far registrare all'ascoltatore cosa ha ascoltato. Da questa registrazione si calcola poi la *percentuale di articolazione delle sillabe (PSA)*.

Per tenere conto dell'acustica della stanza si fa precedere l'elenco delle sillabe da una breve frase. Knudsen ha utilizzato questa tecnica ed ha posto in relazione il PSA con il tempo di riverberazione della stanza. Tali risultati non tengono conto dell'orientamento della sorgente che, invece, si è dimostrato fondamentale nell'ascolto all'interno di sale teatrali.

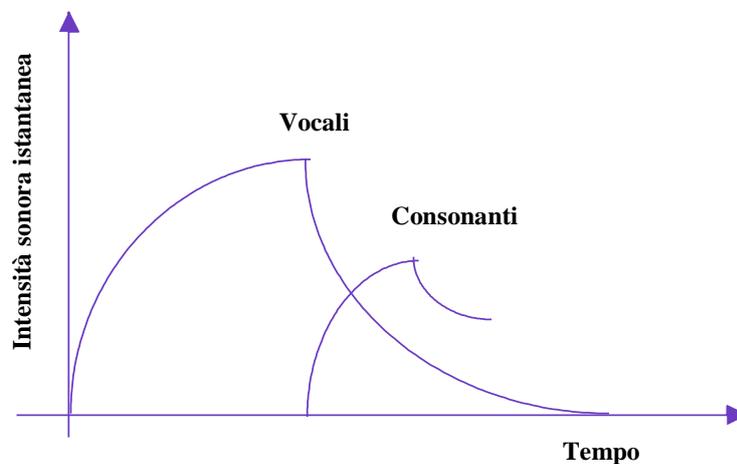


Figura 302: Mascheramento delle consonanti da parte di una vocale

Gli effetti della sala sul parlato sono sintetizzati in Figura 302, (Kurtovic, 1975), per il caso comune di una consonante mascherata (o parzialmente mascherata) da una vocale che la precede. Se una sorgente sonora viene attivata in una stanza il livello di pressione sonora cresce in modo che possiamo ritenere esponenziale fino ad un livello stazionario. Una sorgente di breve durata tende ad avere lo stesso transitorio ma non raggiunge le condizioni di stazionarietà precedenti, vedi Figura 302. In entrambi i casi il decadimento è di tipo esponenziale

Poiché le vocali sono più intense e di maggiore durata rispetto alle consonanti, un tempo di riverberazione maggiore porta ad un mascheramento della consonante ed essendo gli elementi

caratterizzanti del parlato di minore durata del tempo di riverberazione è evidente che occorre individuare una misura più significativa che tenga conto della sequenza delle riflessioni immediate. Una misura significativa è data dal rapporto fra le riflessioni immediate e quelle ritardate ricevute dall'ascoltatore. Il ritardo massimo per le riflessioni immediate è stabilito in considerazione della durata del suono parlato. Una velocità tipica è di 5 sillabe al secondo, ovvero in media di 15 suoni elementari (fra vocali e consonanti nella sequenza sopra indicata) al secondo. Pertanto la durata media del suono elementare del linguaggio parlato è di 70 ms.

Misure di intelligibilità hanno preso in esame un ritardo variabile fra 50 e 80 ms. Un parametro energetico appropriato è stato proposto da Thiele (1953) col nome di *frazione di energia immediata o definizione (Deutlichkeit)* e può essere ottenuto dalla risposta impulsiva della sala fra sorgente e ricevitore.

La *frazione di energia immediata o definizione* è il rapporto fra l'energia totale nei primi 50 ms dal suono diretto e quella totale ricevuta<sup>1)</sup>, cioè :

$$D = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

Valori di  $D > 0.5$  sono considerati soddisfacenti per l'intelligibilità del parlato.

La scelta del parametro *definizione* è dettata dalla maggiore semplicità rispetto ad altri, anche se questi meglio si correlano con l'intelligibilità, ma sono di difficile valutazione. La *frazione di energia immediata* ha il vantaggio di potere essere usata anche come parametro di progetto architettonico ed è misurabile in modo relativamente semplice.

Sono quindi due i fattori determinanti discussi in questo paragrafo per l'intelligibilità del linguaggio parlato: il rapporto segnale/rumore e la risposta acustica della sala. E' opportuno, in genere, considerarli entrambi contemporaneamente anche se spesso si preferisce affrontarli separatamente.

#### 14.1.5. SPEECH TRANSMISSION INDEX, *STI*

Questo indice è oggi molto usato per qualificare le qualità acustiche della sala. Originariamente formulato per il parlato è utilizzato anche per la musica, specie per l'opera all'italiana che ha una forte componente recitativa-cantata.

Oltre ad una formulazione analitica è possibile oggi avere anche uno strumento commerciale per una misura diretta<sup>1)</sup>. Il merito dello *STI* è di considerare contemporaneamente sia il rapporto segnale-rumore che la risposta impulsiva dell'ambiente.

L'idea di base è che per avere l'intelligibilità occorre preservare l'involuppo del segnale (Houstgast, 1980). Per misurare la distorsione dell'involuppo si utilizza un rumore modulato in modo sinusoidale fra le frequenze di 0.4 e 20 Hz che sono le frequenze di involuppo tipiche per il parlato<sup>1)</sup>.

---

<sup>30)</sup>Si ricordi che la *definizione* è alquanto simile alla *chiarezza* e ne differisce solo per il limite di integrazione a numeratore (50 ms contro 80 ms). In effetti il ritardo massimo accettabile delle riflessioni laterali immediate per il linguaggio parlato è di 50 ms.

<sup>31)</sup>Lo strumento misura il *RApidSTI*, detto *RASTI* che è una forma semplificata e ridotta dello *STI*.

<sup>32)</sup>Si è già detto che il numero di segnali elementari vocali varia da 7 a 15 al secondo, cioè si ha una frequenza di modulazione di 15 Hz.

Il segnale è modulato al 100% in modo tale che per una frequenza di 10 Hz si ha un istante di silenzio ogni 1/10 di secondo.

Il segnale ricevuto nell'ambiente contiene un suono alterato nei momenti di maggior silenzio a causa delle azioni del rumore di fondo e della risposta acustica impulsiva della sala.

La profondità di modulazione del segnale ricevuto viene misurata a frequenze prestabilite e si ottengono le *Modulation Transfer Function (MTF)* che sono poi usate per calcolare l'indice *STI*.

Ciascuna Funzione di Modulazione di Trasferimento viene pesata in modo opportuno per formare l'indice *STI*. I fattori di pesatura per le sette bande di ottava privilegiano le bande di frequenza più elevata per enfatizzare maggiormente il peso dei suoni complessi (*consonanti*) rispetto ai suoni più semplici (*vocali*). Se la sorgente utilizzata è simile alla voce umana allora le misure dello *STI* tengono conto dell'effetto della riverberazione acustica e della risposta impulsiva sull'intelligibilità. Se le frequenze di modulazione sono ridotte di numero si ha un indice detto *RASTI* (acronimo di *RApid STI*). Lo svantaggio dello *STI* è che, essendo complicato nella definizione, non può essere calcolato manualmente a meno di non usare sofisticati programmi di simulazione<sup>1)</sup> computerizzati dotati della possibilità di simulare la trasmissione del suono negli ambienti.

Inoltre lo *STI* può essere calcolato una volta nota la risposta impulsiva, come lo sono tutti gli indici di natura energetica. L'indice *STI* assume che per preservare l'intelligibilità del parlato in un ambiente è necessario che le caratteristiche di modulazione del linguaggio passino invariate (o quasi) attraverso il sistema ambiente. In pratica il rumore di fondo, le riflessioni ritardate e la riverberazione acustica hanno tutti effetti sulla modulazione del segnale acustico emesso dalla bocca e questa riduzione è utilizzata come misura dell'intelligibilità del parlato.

Si può convertire lo *STI* in un descrittore qualitativo dell'intelligibilità, secondo quanto indicato dalla stessa IEC<sup>1)</sup>, mediante in diagramma del tipo seguente.

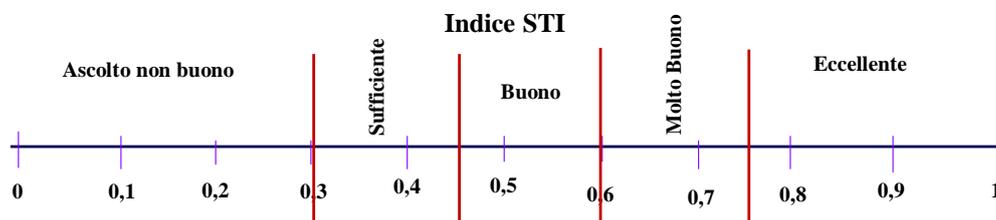


Figura 303: Scala di giudizio di ascolto al variare di *STI*

<sup>33)</sup> Uno di questi programmi è il *MODELER*® della BOSE™. Esso gira su computer del tipo *Apple Macintosh* ed utilizza sofisticati algoritmi proprietari per calcolare lo *STI*. L'ambiente viene modellizzato tramite un CAD grafico interno e la trasmissione sonora viene simulata mediante tecniche di *ray tracing*. L'algoritmo utilizzato è chiamato *HEDC*™ e consente di prevedere correttamente il decadimento energetico delle onde sonore attraverso le interazioni con la sala. In particolare *HEDC*™ prende in considerazione tre parti: le onde dirette, le riflessioni discrete immediate e un campo riverberato. Le onde dirette e riflesse immediate sono trattate con il metodo del *ray-tracing* classico mentre il campo riverberato è calcolato secondo la teoria statistica della riverberazione e cioè supponendo il campo di energia diffuso. Quando un raggio acustico può essere trattato, per la sua lunghezza d'onda e l'energia posseduta, con i metodi dell'acustica geometrica il programma usa il *ray-tracing* altrimenti se la sua energia è degradata viene considerato parte del campo diffuso e quindi trattato come campo riverberato.

<sup>34)</sup> L'indice *STI* è divenuto standard internazionale IEC#268-16.

### 14.1.6. CONVERSIONE DELLO STI IN MISURA DELL'INTELLIGIBILITÀ

L'indice *STI* può facilmente essere correlato alle misure di intelligibilità del linguaggio parlato indicate da vari standard. Fra lo *STI* e il criterio *English Word Intelligibility* (ANSI) si ha la corrispondenza della seguente tabella che è riportata nel diagramma di Figura 304.

Relazione fra l' <i>EWI</i> e lo <i>STI</i>							
<i>STI</i>	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
<i>EWI</i>	30	63	81	90	94	99	100

Tabella 45: Relazione fra *STI* e *EWI*

Per le lingue europee si hanno una relazioni analoghe a quella per l'*EWI* ma ciò non può dirsi per le altre lingue. Per la corrispondenza fra lo *STI* e il metodo *%ALcons*<sup>1)</sup> (*Percentuale di perdita dell'articolazione delle consonanti*) è riportata nella seguente tabella e in Figura 305.

Corrispondenza fra <i>STI</i> e <i>%ALcons</i>										
<i>STI</i>	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
<i>%ALcons</i>	100	60	35	22	13	7	4	3	2	1

Tabella 46: Corrispondenza fra *STI* e *%ALcons*

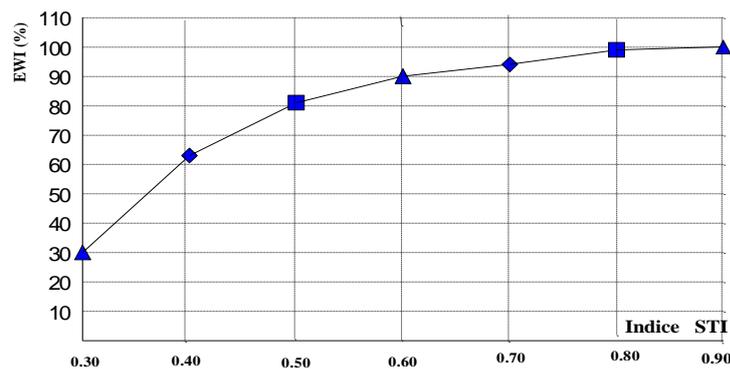


Figura 304: Relazione fra l'indice *STI* e l'*English Word Intelligibility* (*EWI*)

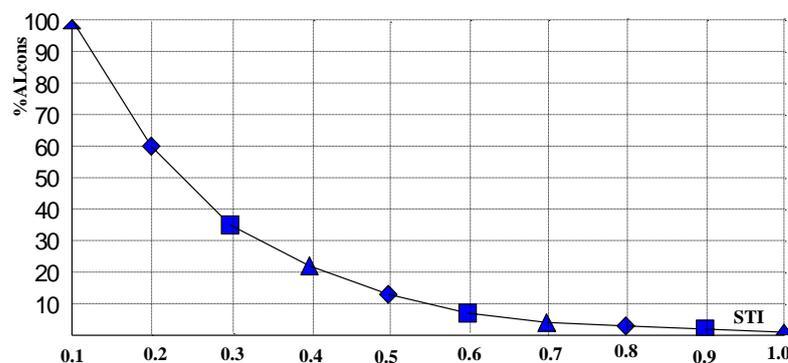


Figura 305: Relazione fra *STI* e l'indice *%ALcons*

<sup>35)</sup>*%ALcons* è definito come percentuali di consonanti non comprese in parole composte senza senso di tre lettere, consonante, vocale, consonante, della lingua tedesca.

Si può anche utilizzare la seguente corrispondenza analitica fra i due indici:

$$\%ALcons\% = 10^{\frac{1-STI}{0.45}} \quad [124]$$

#### 14.1.7. METODOLOGIE DI CALCOLO DELLO STI

Come già detto lo *STI* prende in considerazione tutte le possibili cause di alterazione dell'intelligibilità del parlato, escluse le cause di non linearità. Qualunque alterazione della modulazione del segnale può essere espressa nella forma di un rapporto segnale/rumore. Inizialmente si calcolano le *MTF* (*Modulation Transfer Function*) per le bande di frequenza comprese fra 125 Hz e 8 kHz e in questo modo si converte l'intervallo di modulazione delle frequenze contenute in un *fonema*<sup>1)</sup> della voce umana.

La trasformazione del segnale dovuta alla presenza della sala porta ad una riduzione della modulazione del segnale e del suo decadimento.

Il calcolo dello *STI* può essere effettuato direttamente inviando uno spettro di rumore modulato in ampiezza che si accoppia con il parlato reale all'ingresso del sistema e osservando la riduzione della modulazione all'uscita.

##### Metodo normale di calcolo dello Speech Transmission Index

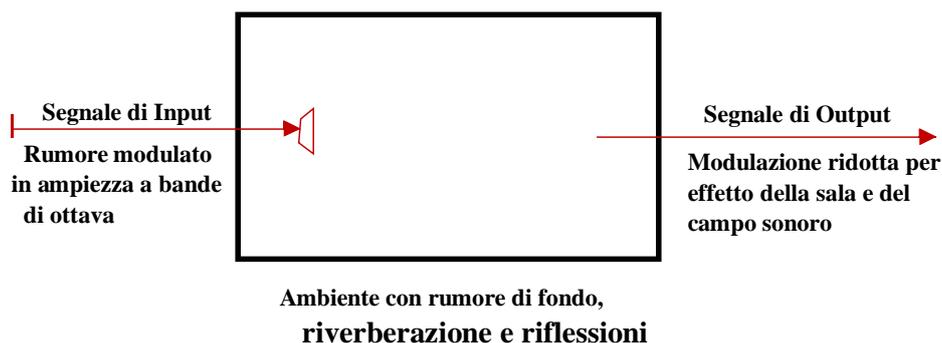


Figura 306: Metodo normale di calcolo dello STI

In particolare se inviamo in ingresso il segnale:

$$s(t) = I_0 (1 + \cos \omega t) \quad [125]$$

con  $\omega$  pulsazione del segnale ( $\omega=2\pi F$ ), il segnale ricevuto in uscita é del tipo:

$$r(t) = I_0 |1 + m(F) \cos(2\pi Ft + \theta)| \quad [126]$$

con  $m(F)$  funzione di modulazione (*Houtgast*, 1985) data dalla relazione:

$$m(F) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(2\pi F \frac{RT}{13.8}\right)^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{-\frac{S/N}{10}}} \quad [127]$$

36) Dicesi *fonema* la più piccola unità distintiva della parola.

ove  $RT$  é il tempo di riverberazione ed  $S/N$  il rapporto segnale rumore. In modo oggi più pratico le  $MTF$  possono essere ottenute con un metodo suggerito da M. Schröder (1981<sup>37</sup>) dalla risposta impulsiva della sala  $h(t)$ , registrata nel punto di ascolto desiderato, calcolando l'indice di modulazione  $m(F)$  per la frequenza più bassa della modulazione della voce umana:

$$m(F) = \frac{\int_0^{\infty} h^2(t) e^{2j\pi Ft} dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \cdot \frac{I_{Parlato}}{I_{Parlato} + I_{Rumore}} \quad [128]$$

A numeratore si ha la trasformata di Fourier del quadrato della risposta impulsiva  $h(t)$ . I termini  $I_{Parlato}$  e  $I_{Rumore}$  sono l'intensità acustica del parlato e del rumore.

Si calcola il rapporto segnale/rumore per ciascuna banda:

$$S/N_k(F) = 10 \text{Log} \frac{m(F)}{1 - m(F)} \quad [129]$$

e si calcola il valore medio  $\overline{S/N_k}$  limitando il rapporto  $S/N_{k(F)}$  a  $\pm 15$  dB:

$$\overline{S/N_k} = \frac{1}{n} \sum_f S/N_k(F) \quad [130]$$

con  $n$  numero delle frequenze di modulazioni. Si calcolano, poi, gli indici di trasmissione del linguaggio per ciascuna banda di frequenza:

$$\overline{TI}_k = \frac{\overline{S/N_k} + 15}{30} \quad [131]$$

e da questi si ottiene lo  $STI$  mediante una somma pesata di  $TI_k$ :

$$STI = \frac{\sum_f (W_k - TI_k)}{\sum_k W_k} \quad [132]$$

ove  $W_i$  é il peso relativo di ciascun indice di trasmissione. I fattori di peso sono dati nella seguente tabella riassuntiva.

FATTORI DI PESO PER BANDE DI OTTAVE PER IL METODO STI							
Frequenza (Hz)	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
Fattore di Peso	12.5	14	11	12	19.5	17.5	13.5

Tabella 47: Fattori di peso per il metodo STI

Nella Figura 307 si ha l'andamento grafico dei fattori relativi di peso per le  $MTF$ . Si osservi come alle frequenze più elevate si abbiano fattori maggiori e ciò privilegia le consonanti (di frequenza elevata) rispetto alle vocali (frequenza bassa) nell'intelligibilità delle parole.

<sup>37</sup>M. Schroeder : *Modulation Transfer Functions: definitions and measurements* - Acustica, Vol. 49, 1981

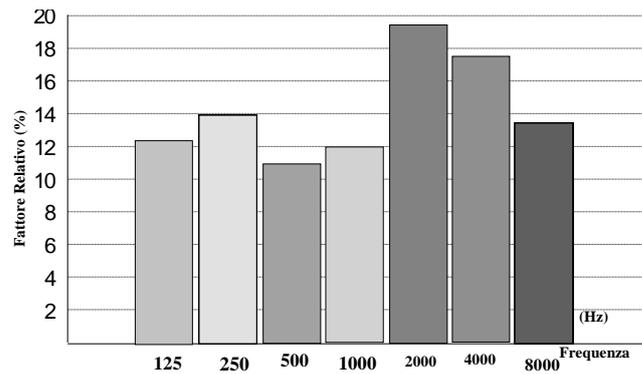


Figura 307: Fattori relativi di peso per le MTF

Lo *STI* consente di determinare la *distanza critica* (*dc*) oltre la quale l'intelligibilità diviene inaccettabile.

Quest'ultima decresce poco per piccole distanze dal parlatore, poi dopo la distanza *dc* diviene quasi costante a causa della dominanza del suono riflesso.

Per sale da conferenza aventi fattori di assorbimento compresi fra 0,1 e 0,4 la *distanza critica* è compresa fra 15 e 20 metri.

#### 14.1.8. MODALITÀ DI CALCOLO DEL RASTI

Il metodo *RASTI* consente di avere misure *oggettive* dell'intelligibilità del parlato. Il calcolo è in tutto simile a quello indicato per lo *STI* eccetto poche differenze:

- non si prendono in esame le bande esterne all'intervallo 500-2 kHz;
- tutti i rapporti segnale/rumore ( $X_i$ ) sono limitati a 15 dB;
- si calcola la media aritmetica ( $\overline{X_i}$ ) di tutti gli ( $X_i$ ) mediante la relazione:

$$RASTI = \frac{\overline{X_i} + 15}{30} \quad [133]$$

Esistono altri limiti per la validità delle misure del *RASTI* :

- non sono prese in considerazione le distorsioni e le non linearità;
- non si tiene conto del segnale puro che esce dai limiti 500-2 kHz;
- si ipotizza un rumore di fondo stazionario.

#### 14.1.9. PROPRIETÀ DIAGNOSTICHE DELLE MTF ED USO DELLO STI

Le funzioni di modulazione consentono di effettuare un grande numero di diagnosi sulle cause di intelligibilità del parlato all'interno delle sale. Con riferimento allo schema di calcolo tradizionale di figura 47 vedremo quali sono le influenze della riverberazione, del rumore e delle riflessioni sulle *MTF* e quindi sullo *STI*.

#### 14.1.10. EFFETTI DEL RUMORE DI FONDO

Il rumore interagisce con il parlato riducendo la modulazione *in modo indipendente dalla frequenza* e in valore costante. E' importante controllare il rapporto segnale/rumore e non solamente il livello assoluto del segnale. Il valore della riduzione delle *MTF* dipende solamente da questo rapporto in ciascuna banda d'ottava. Le *MTF* e lo *STI*, assumendo il rapporto segnale

rumore costante per tutte le frequenze, si modificano secondo quanto rappresentato nella figura 49.

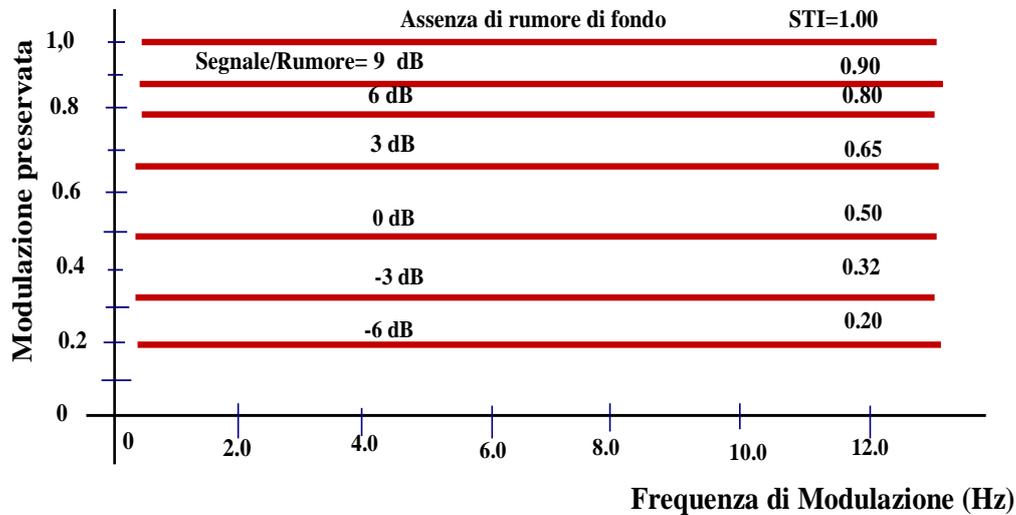


Figura 308: MTF per alcuni valori del rapporto Segnale/Rumore

Si può osservare dalla figura che se il rapporto segnale/rumore di fondo è maggiore di 10 dB allora si hanno effetti trascurabili sull'intelligibilità.

Si può concludere che in presenza di rumore di fondo elevato si hanno due possibilità per incrementare *STI* e quindi l'intelligibilità: aumentare il livello del segnale parlato o ridurre quello del rumore di fondo.

#### 14.1.11. EFFETTI DEL RUMORE DELLA RIVERBERAZIONE

La riverberazione produce un effetto di decadimento la cui intensità dipende dal valore del *tempo di riverberazione*. Analogo effetto di allungamento del suono si ha sulle funzioni di modulazioni di ingresso nella sala: queste vengono distorte (allungate) per effetto del decadimento esponenziale del segnale.

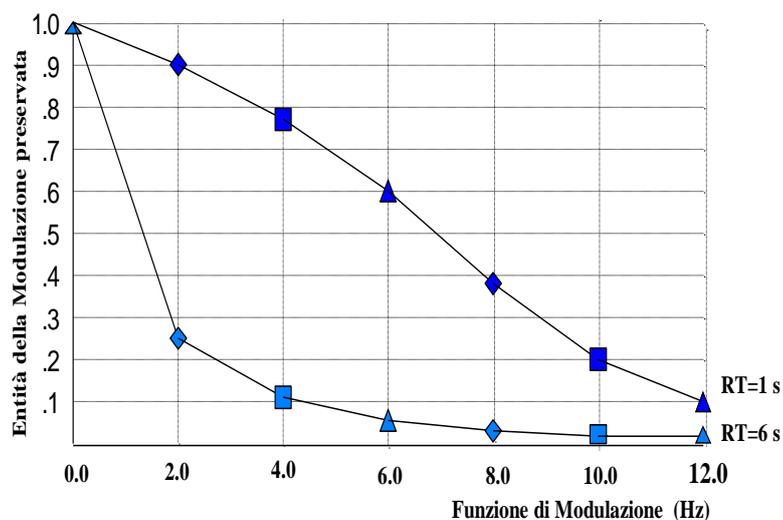


Figura 309: Interazione della riverberazione con le funzioni di modulazione

Per un dato *tempo di riverberazione* le funzioni modulate di bassa frequenza risentono meno degli effetti di distorsione poiché il decadimento esponenziale è limitato rispetto al periodo delle stesse funzioni.

Per le funzioni modulate di alta frequenza, sempre a parità di *tempo di riverberazione*, si hanno effetti maggiori. Naturalmente se cresce il *tempo di riverberazione* l'entità del disturbo cresce. In Figura 309 si ha l'andamento dell'effetto sulle *MTF* con *tempo di riverberazione*  $RT=1$  e  $RT=6$  secondi. Analoghe curve si possono tracciare per valori diversi del tempo di riverberazione.

#### 14.1.12. EFFETTI DELLE RIFLESSIONI RITARDATE

Le riflessioni immediate non influenzano negativamente lo *STI* anzi lo rafforzano, come già osservato in precedenza. Le riflessioni ritardate, invece, interagiscono con le funzioni di modulazione producendo effetti negativi.

In pratica alla funzione originale di modulazione, a data frequenza, si aggiunge quella ritardata che si combina con la prima formando onde complesse.

In Figura 310 si ha un'indicazione schematica della combinazione di due onde (diretta e riflessa) aventi uno sfasamento pari a  $\Delta\tau$ .

A pari ritardo  $\Delta\tau$  le funzioni di modulazione di frequenza inferiore sono meno corrotte che non quelle di frequenza più elevata per le quali si può avere anche un'opposizione di fase fra l'onda diretta e quella riflessa.

Al crescere ancora della frequenza delle funzioni di modulazione si ritorna ancora in fase e diminuisce il disturbo. In Figura 311 si ha l'andamento del disturbo per ritardi  $\Delta\tau=20$  ms e  $\Delta\tau=70$  ms. Per  $\Delta\tau=70$  ms si può osservare una cuspide a 7.5 Hz a sinistra della quale la modulazione subisce un disturbo crescente e a destra un disturbo decrescente.

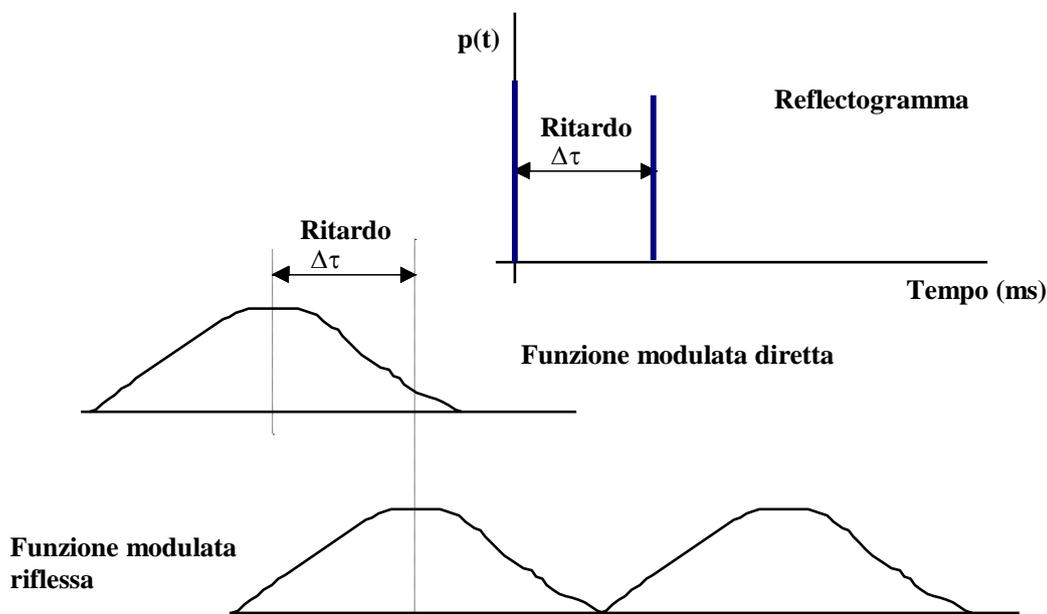


Figura 310: Combinazione della funzione modulata diretta e riflessa con ritardo  $\Delta\tau$

In pratica le riflessioni ritardate si comportano come filtri applicate alle funzioni di modulazione dirette.

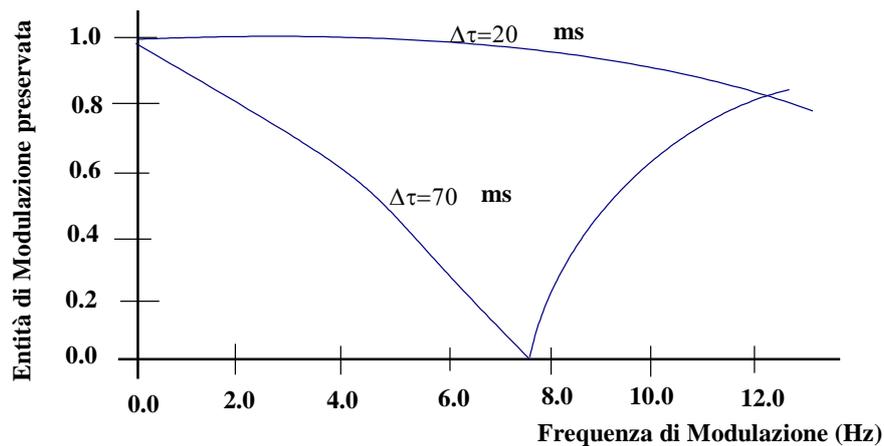


Figura 311: Interazione della Modulazione con le riflessioni ritardate

#### 14.1.13. IL CRITERIO DEL LIVELLO TOTALE DEL PARLATO PER I TEATRI

Il *livello sonoro del parlato* è il livello sonoro in una data poltrona (con un attore posto in una particolare posizione ed orientamento nel palco) con riferimento al livello medio diretto a 10 metri di distanza. Normalmente si considera che il livello di potenza medio per un attore sia di 70 dB e ciò porta ad avere un livello sonoro diretto a 10 metri di distanza di 39 dB. Se  $S$  è il livello totale sonoro del parlato allora il livello reale nella poltrona è  $(39+S)$  dB. Per valutare il rumore di fondo si può usare il metodo del *Noise Criteria (NC)* che definiscono il livello massimo consentito secondo la seguente tabella e in forma grafica si ha l'abaco di Figura 312.

VALORI NC (NOISE CRITERIA)							
	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
NC70	79	75	72	71	70	69	68
NC65	75	71	68	66	64	63	62
NC60	71	67	63	61	59	58	57
NC55	67	62	58	56	54	53	52
NC50	64	58	54	51	49	48	47
NC45	60	54	49	46	44	43	42
NC40	57	50	45	41	39	38	37
NC35	52	45	40	36	34	33	32
NC30	48	41	35	31	29	28	27
NC25	44	37	31	27	24	22	21
NC20	40	33	26	22	19	17	16
NC15	36	29	22	17	14	12	11

Tabella 48: Valori delle curve NC

Se si ipotizza che il livello sonoro del rumore nei teatri sia non superiore a NC25 si hanno 27 dB a 1000 Hz al di sopra dell'ottava più rilevante. Da studi recenti si accetta un rapporto segnale/rumore di 12 dB nei teatri che è più elevato degli standard per la trasmissione del parlato

ma si giustifica per il fatto che in teatro si deve intendere un linguaggio non familiare come pure si devono ascoltare i sussurri emessi sulla scena.

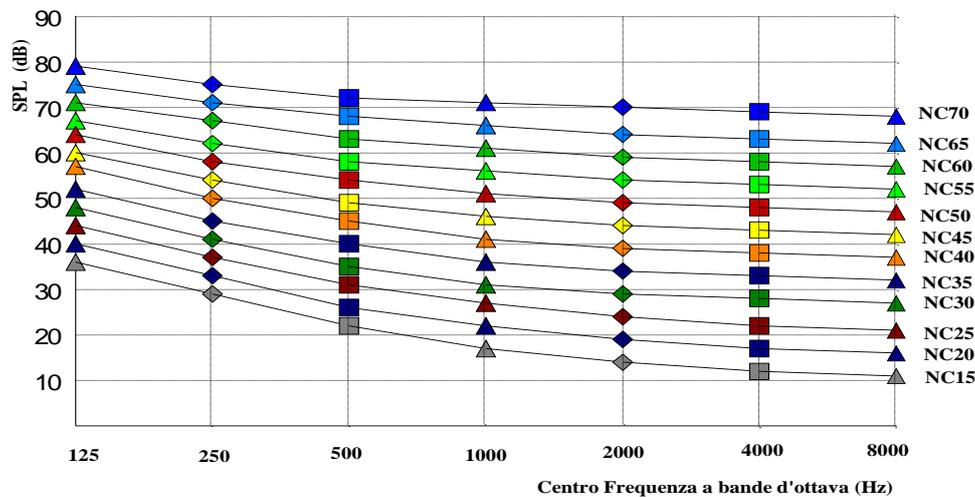


Figura 312: Curve NC per il massimo rumore di fondo

In definitiva deriva il seguente criterio per la trasmissione del parlato:

$$39 + S > 27 + 12$$

ovvero deve essere  $S > 0$  dB. Questo criterio si è dimostrato valido in molte ricerche recenti (Barron, 1993).

#### 14.1.14. NUOVA TEORIA DELLA TRASMISSIONE SONORA PER IL LINGUAGGIO PARLATO

Si è già detto della nuova teoria per la trasmissione del suono in occasione della trattazione delle sale per concerto.

La stessa trattazione può essere applicata per il linguaggio parlato consentendo di prevedere il comportamento medio di una sala sulla base del volume della sala, del tempo di riverberazione e della distanza sorgente-ricevitore. Si osserva subito che in questo caso si hanno maggiori limitazioni e la validità generale è meno dimostrata.

Ci sono tre ulteriori complicazioni per i teatri:

- la voce umana è direzionale;
- le condizioni non sono sufficientemente diffuse per una previsione semplificata delle riflessioni immediate;
- nei teatri con proscenio parte dell'energia si perde attraverso l'apertura dello stesso proscenio.

La direzionalità della sorgente si esprime in funzione del valore medio su tutte le direzioni. Per la media delle frequenze di 500, 1000 e 2000 Hz l'indice di direttività verso la direzione in avanti è 3 dB pari ad un fattore 2 rispetto alla media. Per le varie direzioni si hanno i seguenti valori:

Fattori correttivi per le varie direzioni					
Angolo fra ascoltatore e parlatore	0°	45°	90°	135°	180°
Fattore di direttività (2)	2.0	1.67	0.87	0.44	0.70

Tabella 49: Fattori correttivi per la voce umana

Il fattore di direttività si applica, ovviamente, al suono diretto. Nei teatri non si può prevedere con precisione il suono riflesso immediato con lo stesso metodo usato per le sale da concerto (vedi § 5.4 per la trattazione completa).

Pertanto si preferisce utilizzare il metodo del *rapporto delle riflessioni immediate*  $n$  dato dal rapporto fra l'energia sonora immediata (entro i 50 ms) e l'energia diretta teorica. Per sola energia diretta il rapporto  $n$  vale 1, con suono diretto e una forte riflessione immediata tale rapporto vale 2. Il *rapporto delle riflessioni immediate* ha anche un significato fisico: il numero delle riflessioni immediate  $N_{r,i}$  è approssimativamente data dalla relazione:

$$N_{r,i} = n - 1$$

Se una riflessione arriva molto presto e la sua intensità è elevata allora il suo contributo al *rapporto delle riflessioni immediate* è 1. Le riflessioni successive sono solitamente meno intense del suono diretto e forniscono un contributo inferiore al rapporto  $n$ .

Tuttavia in un teatro dove l'ascoltatore è posto di lato o posteriormente al parlatore una riflessione laterale può essere più intensa del suono diretto se questo è generato nella direzione in avanti del parlatore.

L'aspetto importante del rapporto  $n$  è che esso offre una misura semplice del numero di riflessioni laterali immediate. Valori misurati in vari teatri inglesi (vedi Barron, 1993) mostrano valori di  $n$  variabili fra 2.4 e 5.3 con i valori più elevati per i teatri con proscenio.

I teatri con valori di  $n$  più elevati sono acusticamente migliori e così pure migliora l'intelligibilità della parola. Si è già detto che un altro fattore che influenza l'intelligibilità del parlato è il suono ritardato che si può ritenere sufficientemente indipendente dal rapporto delle riflessioni immediate: un tempo di riverberazione più basso e la presenza dell'apertura del proscenio riducono sensibilmente l'energia sonora ritardata e quindi migliora l'intelligibilità del parlato.

Il *rapporto delle riflessioni immediate* può essere utilizzato per calcolare le distanze limiti nei teatri. Riassumendo, nella progettazione dei teatri si hanno due criteri da rispettare:

- un adeguato rapporto dell'energia riflessa immediata;
- un adeguato livello del parlato.

Sulla base di osservazioni sperimentali e soggettive si è trovato che il rapporto limite dell'energia riflessa immediata è  $n=0,5$ . Il livello totale, inclusi i contributi delle riflessioni e della riverberazione, dovrebbe superare il livello medio del suono diretto a 10 m di distanza dal parlatore, secondo quanto detto in precedenza. Questi due criteri portano direttamente alla requisito che il suono riflesso immediato deve essere non inferiore di -3 dB rispetto al livello medio del suono diretto a 10 metri. Si hanno, pertanto, distanze massime diverse per direzioni diverse dal parlatore in funzione del *rapporto delle riflessioni immediate*.

Nella tabella seguente si hanno queste distanze limiti. I valori riportati mostrano come complichi le cose la direttività della voce e come invece aiutino molto le riflessioni laterali immediate. Ad esempio occorrono due riflessioni immediate forti in un teatro per avere una distanza massima parlatore-ascoltatore di 15 m, ne occorrono quattro per una distanza di 20 m nella direzione meno favorevole.

Rapporto riflessioni immediate	Distanze limiti (m)		
	Angolo fra ascoltatore e la direzione anteriore del parlatore		
	0°	90°	150°
1	20.0	13.0	8.9

2	28.3	18.4	12.8
3	34.6	22.6	15.5
4	40.0	26.1	17.9
5	44.7	29.2	20.0

Tabella 50: Rapporto fra le riflessioni immediate e le distanze limiti

I valori della precedente tabella sono stati ricavati (vedi Barron, 1993) considerando solamente gli effetti delle riflessioni laterali immediate e supponendo che il livello delle riflessioni laterali ritardate sia ottimale (cosa non sempre realizzata).

La nuova teoria della trasmissione acustica applicata ai teatri porta ad avere, per l'energia immediata, la seguente relazione:

$$\text{Energia\_Immediata} = e_d = d + e = 100\delta \frac{n}{r^2} \quad [134]$$

Quest'espressione è accurata per suono diretto non ostacolato ma occorre conoscere il vero valore di  $n$ . Per il suono ritardato si usa una relazione simile a quella trovata per le sale da concerto ma con tempo limite di 50 ms.

Un'ulteriore ipotesi introdotta per i teatri con proscenio è che non si abbia energia emergente dalla bocca del proscenio.

Se la sorgente fosse omnidirezionale si potrebbe assumere una frazione dell'angolo solido sotto il quale la sorgente vede l'auditorium.

Tuttavia con sorgenti direzionali il calcolo diviene più complesso e assume importanza una grandezza detta *frazione di energia dell'auditorio*  $f$ .

Nel caso di una sorgente sulla linea del proscenio e che punti verso il palco (all'indietro) si ha  $f=0.5$  mentre nel caso che punti verso l'auditorio (in avanti) si ha  $f=0.72$ . Ciò detto si ha la seguente relazione:

$$\text{Energia\_Ritardata} = I = 31200 \cdot f \cdot \frac{RT}{V} e^{-0.04r/RT} \cdot e^{-0.68/RT} \quad [135]$$

Le relazioni sopra indicate possono essere usate per calcolare le frazioni di energia immediata e di energia ritardata nonché il livello sonoro totale. Pertanto esse costituiscono un modo rapido di verifica del comportamento dei teatri.

## 14.2. ELEMENTI DI ACUSTICA FONETICA

L'inizio storico delle ricerche e dello studio del moderno linguaggio parlato è dato dagli studi di T. Chiba e M. Kajiyama nel 1941, di G. Fant nel 1960 e di H. Mol nel 1970.

Si può quindi definire l'acustica fonetica una scienza giovane che ha ricevuto maggiore impulso negli ultimi anni anche e soprattutto per l'eccezionale progresso tecnologico dei mezzi di indagine. Non è possibile ipotizzare uno sviluppo della fonetica senza l'uso di strumenti di indagine sempre più sofisticati e, al tempo stesso, della sinergia con la laringoiatria e la foniatra.

Oggi è possibile effettuare in tempo reale (e su strumenti relativamente poco costosi) analisi spettrali che solo poco più di cinque anni fa erano possibili in laboratori specializzati e dotati di costose apparecchiature elettroniche, acustiche e fonetiche.

Possiamo considerare la fonetica acustica un connubio di elementi di Acustica Fisica e Fisiologica e di Teoria dei Segnali. Infatti proprio l'applicazione delle metodologie tipiche della teoria dei segnali all'acustica fonetica ha determinato quell'avanzamento delle conoscenze così

determinanti per la comprensione dei meccanismi fondamentali della fonometria con applicazioni che spaziano dalla linguistica alla medicina foniatica.

Per comprendere meglio l'impianto deduttivo dell'analisi e del riconoscimento del parlatore occorre subito introdurre alcuni concetti essenziali.

### 14.2.1. LE ONDE SONORE

Il suono é una sensazione provocata da un insieme di onde sonore elementari di pressione (dette anche suoni puri) che si sommano l'un l'altra per comporre forme complesse. Nella Figura 1 é rappresentata una forma d'onda complessa che é somma di tre forme semplici (cioè sinusoidali pure) indicate nella sezione A della figura. Ogni forma d'onda elementare può essere caratterizzata da tre parametri: ampiezza, frequenza e fase.

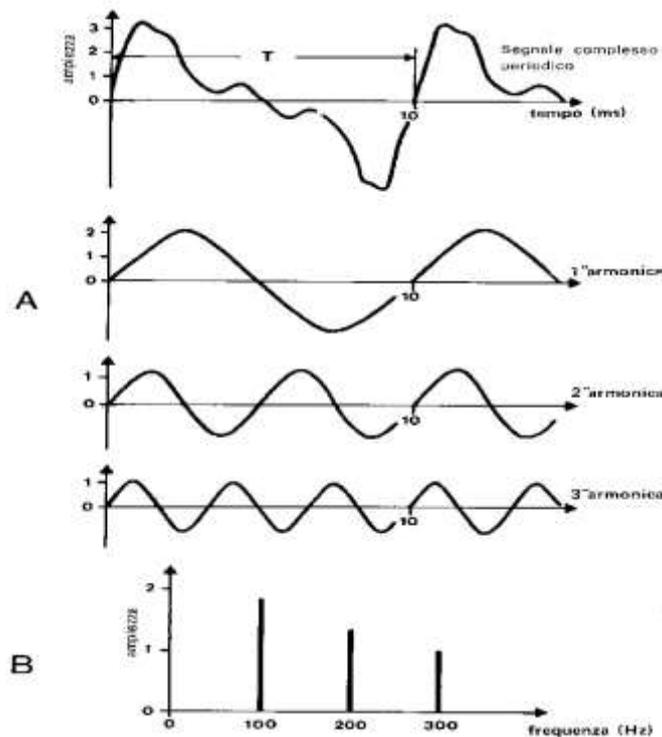


Figura 313: Forma d'onda complessa e sua scomposizione in forme elementari.

L'ampiezza é data dal valore istantaneo assunto dall'onda, la frequenza indica il numero di volte in cui si ripete un ciclo nell'unità di tempo (Hz). La fase é lo sfasamento temporale fra l'inizio al tempo zero e l'istante di valore nullo della curva.

Dato il peso poco rilevante della fase nel campo dell'acustica fonetica la si trascurerà nel prosieguo. Nella sezione A della figura si ha in ascissa il tempo e in ordinata l'ampiezza che l'onda assume ad ogni istante.

Una rappresentazione che nelle applicazioni tecnico-scientifiche trova interesse e vantaggi operativi é data da un diagramma avente in ascisse la frequenza e in ordinata il valore dell'ampiezza massima dell'onda. Si ha, in questo modo, lo spettro di un segnale elementare costituito da una linea spiccata alla frequenza dell'onda considerata ed avente un'altezza pari al valore dell'ampiezza massima.

Nella sezione B della figura é riportato lo spettro del segnale complesso, cioè una rappresentazione che ha in ascissa la frequenza e in ordinata le ampiezze di ciascuna delle tre onde elementari che compongono il segnale considerato. Il matematico francese Fourier ha dimostrato che possibile scomporre (mediante opportuno procedimento matematico detto

*Trasformazione di Fourier*<sup>38</sup>) un segnale complesso in una somma di forme d'onda elementari di tipo sinusoidali e cosinusoidali tali che ogni armonica ha frequenza multipla intera della prima, detta fondamentale. Così, ad esempio, se la prima armonica ha frequenza 100 Hz la seconda avrà frequenza 200 Hz, la terza 300 Hz e così via per le armoniche di ordine superiore.

### 14.2.2. FREQUENZE DELL'UDITO

Non tutte le frequenze sono udibili da parte dell'uomo medio (detto anche normotipo) ma solo quelle comprese fra 20 e 20.000 Hz. Al di sotto di 20 Hz si hanno gli infrasuoni e al di sopra di 20.000 Hz si hanno gli ultrasuoni. Per gli animali l'intervallo dell'udito varia fortemente arrivando a superare, ad esempio, i 200.000 Hz nei pipistrelli.

Va anche osservato che l'orecchio non presenta la stessa sensibilità alle varie armoniche: l'Uomo medio sente meglio alle frequenze fra 1000 e 4000 Hz mentre sente meno (relativamente alle prime) quelle di bassa e di alta frequenza. Un'analisi delle frequenze dei suoni reali dimostra che la zona di massima sensibilità dell'uomo coincide con quella del parlato e pertanto si può affermare che il nostro sistema uditivo si è specializzato, nel corso dei millenni, nei suoni di frequenza media. I meccanismi dell'udito sono piuttosto complessi e solo da qualche decennio si hanno conoscenze sufficienti alla comprensione della fenomenologia dell'apparato uditivo. Questo è costituito da tre zone distinte: l'orecchio esterno (la tromba esterna e il canale timpanico fino alla finestra timpanica), l'orecchio medio (staffa, incudine e martelletto e i canali linfatici) e l'orecchio interno (coclea e terminazioni pilifere del nervo acustico). La curva di udibilità ha l'andamento a campana sopra descritto proprio per effetto della conformazione dell'apparato uditivo che presenta risonanze nella zona delle frequenze medie fra 1000 e 4000 Hz.

### 14.2.3. LE FORMANTI FONETICHE

Se consideriamo lo spettro di una vocale si la situazione indicata nella Figura 2. Nella parte superiore è rappresentato lo spettro di una vocale e in tratteggio è riportata la curva che involupa i valori degli estremi superiori delle singole armoniche. Si può facilmente osservare che si vengono a formare degli andamenti a cuspide in corrispondenza di alcune frequenze che rappresentano punti di massimo relativo: queste frequenze sono dette formanti del suono dato e sono indicate in figura con le lettere F1, F2, F3, F4, F5, ...

Si vedrà nel prosieguo l'importanza di queste formanti per gli scopi della presente perizia. Nella zona inferiore della figura seguente sono rappresentate due particolari forme d'onda, entrambe periodiche, la prima formata da semionde sinusoidali e la seconda da gradini

---

<sup>38</sup> L'Analisi di Fourier si basa sull'omonimo teorema e cioè sulla proprietà di un segnale temporale di poter essere scomposto in una somma di sinusoidi (serie). In generale si può dire che tanto più "complicato" è il segnale temporale, maggiore è il numero di componenti che lo compongono e ciascuna componente viene identificata mediante la propria ampiezza e la propria fase. La fase descrive lo spostamento temporale di una certa componente, es. lo spostamento tra  $\sin x$  e  $\cos x$ . Fase ed ampiezza possono essere descritte come funzioni della frequenza; cioè la *Trasformata* di un segnale temporale. In altri termini potremmo pensare alla *Trasformata di Fourier* come l'equivalente in frequenza di un segnale temporale; essa contiene le medesime informazioni del segnale temporale tanto che, applicando una *Trasformata Inversa* alla *Trasformata di Fourier* si ottiene nuovamente il segnale nel tempo. Se non si tiene conto della fase della trasformata tracciando solamente l'ampiezza in funzione della frequenza, si ottiene lo spettro della frequenza (*frequency spectrum*), chiamato anche spettro dell'energia (*energy spectrum*) che non è che una parte del *power spectrum* o spettro di potenza. Solitamente l'ampiezza viene espressa in dB mentre la frequenza in Hz. I picchi dello spettro di potenza identificano le singole componenti.

rettangolari. Si osservi come gli andamenti negli spettri di questi due segnali manchino le formanti che invece sono presenti nello spettro della vocale.

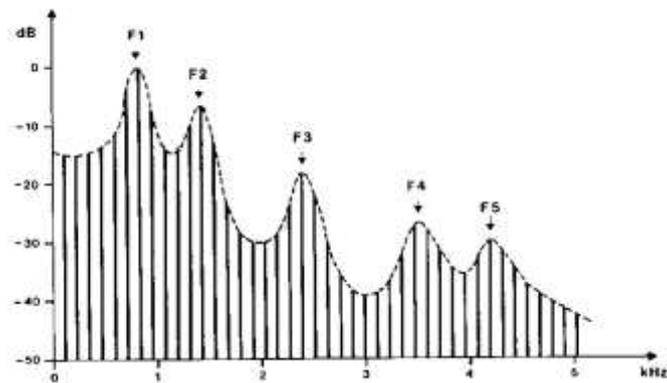


Fig. 14 - Spettro di una vocale [a] con evidenziate l'inviluppo spettrale (a tratteggio) e le prime cinque formanti.

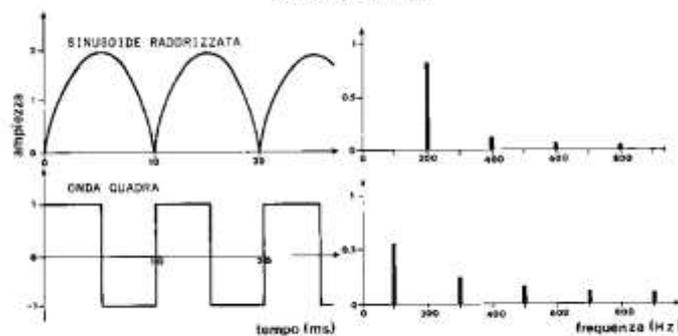


Fig. 15 - Oscillogramma e relativo spettrogramma di una «sinusoide raddrizzata» (sopra) e di una «onda quadra» (sotto).

Figura 314: Formanti di una vocale, di un suono periodico sinusoidale e a gradino.

#### 14.2.4. GLI SPETTROGRAMMI

Da quando l'informatica e l'elettronica hanno consentito di potere effettuare il calcolo della trasformata di Fourier<sup>39</sup> in tempi tanto brevi da potere essere considerati istantanei si è potuto tracciare in tempo reale una particolare rappresentazione di un suono: lo spettrogramma o anche sonogramma.

Esso è in pratica una rappresentazione tridimensionale avente in ascisse il tempo, in ordinate la frequenza e nella terza dimensione l'altezza delle armoniche. Non potendo rappresentare la terza dimensione su carta è invalso l'uso di indicare l'altezza delle armoniche con gradazioni di colore o di grigio: maggiore è il valore dell'altezza più nero (se si usa la scala di grigi) o di colore più vivo (rosso, se si usa la scala di colori) è il punto corrispondente.

In figura seguente è riportato un sonogramma (spettrogramma al centro della figura, sezione B) della parola [AI] contenente due vocali fondamentali. Nella parte superiore (sezione A) è riportato l'andamento temporale delle forme d'onda delle vocali A ed I.

<sup>39</sup> Si dimostra che le vocali sono molto più energetiche delle consonanti e che l'energia da esse trasportata può essere superiore di più di un ordine di grandezza rispetto a quella delle consonanti. Inoltre lo spettro delle consonanti è molto più ricco di armoniche di quanto non lo sia quello delle vocali. Il nostro cervello sintetizza i suoni dovuti alle vocali con la zona a destra e quello dovute alle consonanti con la zona a sinistra. Quest'ultima è anche specializzata per la sintesi di suoni complessi mentre quella a destra per suoni più semplici.

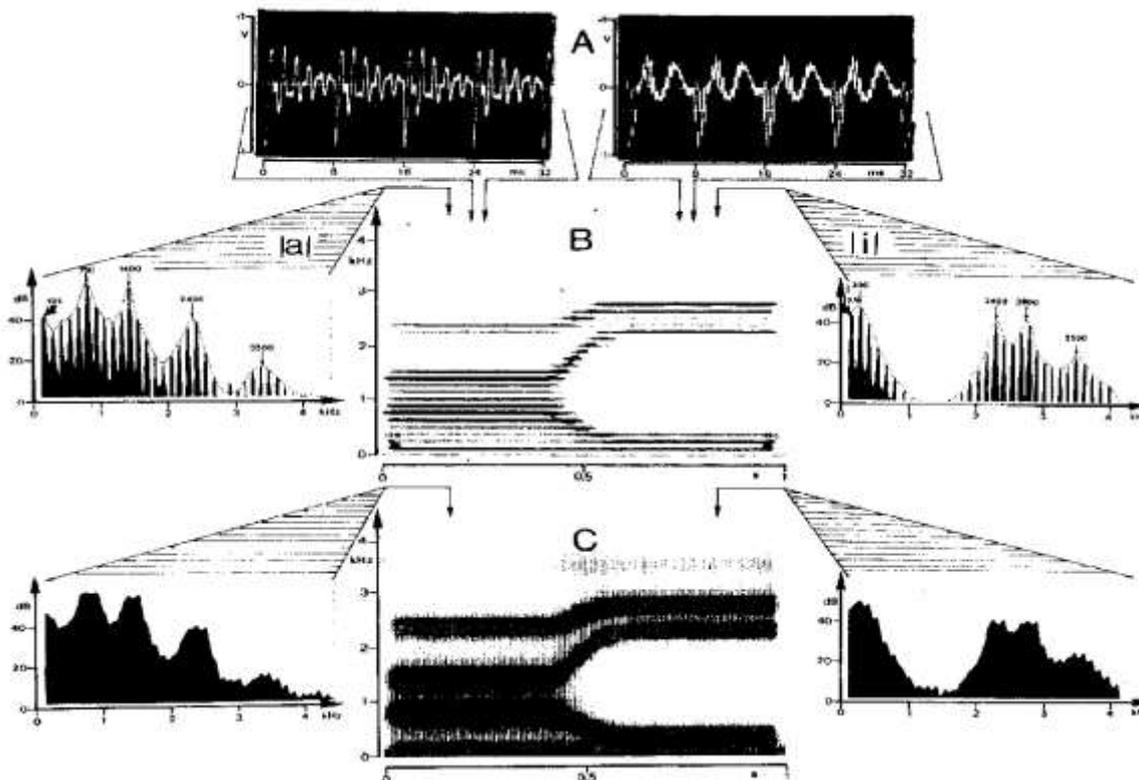


Figura 315: Sonogramma della parola [AI] e delle formanti delle vocali A ed I.

Nella sezione B sono riportati: al centro il sonogramma completo, a sinistra lo spettro a banda stretta (100 Hz) in una sezione della vocale A e nel quale si vedono chiaramente le formanti  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ,  $F_4$  ed  $F_5$ , a destra è riportato lo spettro della vocale I nel quale si evidenziano le prime cinque formanti.

Nella sezione C della figura precedente sono riportate al centro il sonogramma completo e le analoghe sezioni per le vocali A ed I (a sinistra e a destra) ottenuto con un'analisi di Fourier a banda larga (usualmente 250 Hz).

Al fine della determinazione delle formanti può essere più utile riferirsi all'analisi a banda larga oggi convenzionalmente accettata come quella di riferimento nello studio della fonetica. In entrambe le due tipologie di formazione delle FFT, le formanti (che sono le frequenze di picco e quindi di maggiore intensità) sono evidenziate negli spettrogrammi come zone di maggiore annerimento (la terza dimensione è quindi rappresentata in modo convenzionale) e quindi l'individuazione delle formanti è effettuata leggendo in ordinata (si ricordi che lo spettrogramma ha in ascissa il tempo e in ordinate la frequenza) le frequenze corrispondenti.

In figura seguente è riportato lo spettrogramma della parola [AIUOLE] pronunciata dal sottoscritto C.T. Si osservi a destra una griglia di riferimento che consente di determinare le frequenze delle formanti (zone giallo-verdi dello spettro). In alto è rappresentato l'oscillogramma<sup>40</sup> della stessa parola.

Nello spettrogramma è riconoscibile l'insieme delle vocali [AI] all'interno della parola [AIUOLE].

Nella figura successiva è rappresentato l'andamento temporale della stessa parola [AIUOLE] pronunciata da un parlatore.

Successivamente si ha la stessa parola rappresentata in forma spettrale.

<sup>40</sup> Prende il nome di *oscillogramma* la rappresentazione *tempo-ampiezza* del suono

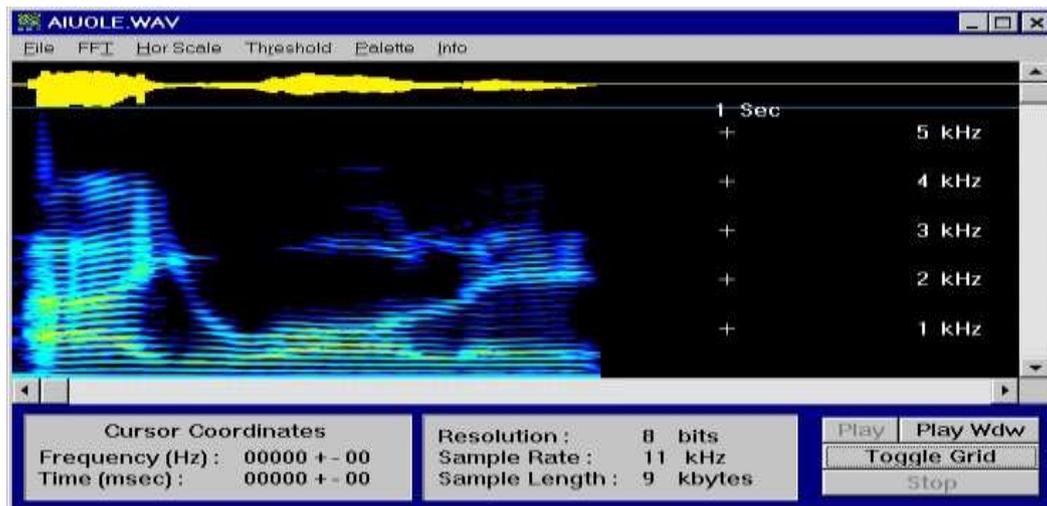


Figura 316: Spettrogramma della parola [AIUOLE].

Le due figure si riferiscono allo stesso brano ma da due punti di vista differenti: la prima fornisce l'andamento bidimensionale del segnale acustico (diagramma ampiezza-tempo detto oscillogramma) mentre la seconda fornisce l'andamento tridimensionale frequenza-tempo - ampiezza, detto spettrogramma.

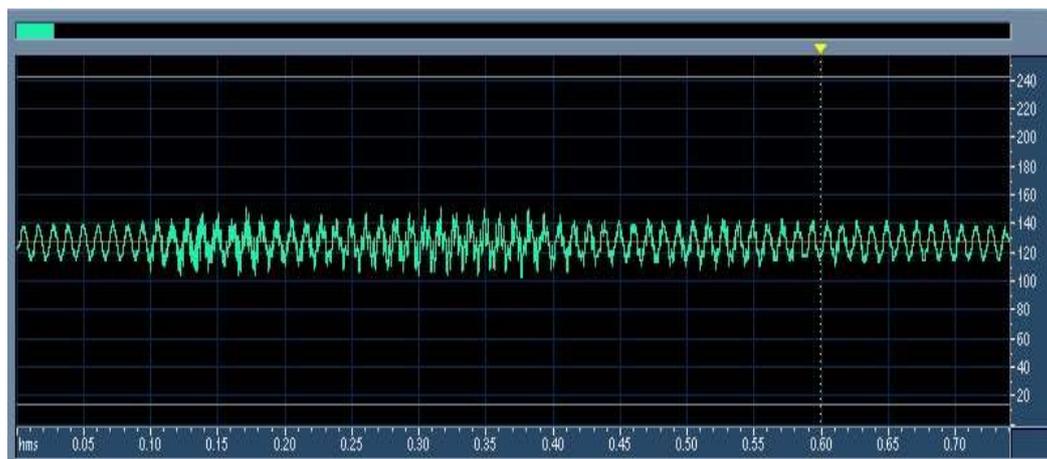


Figura 317: Oscillogramma della parola [Aiuole] pronunciata da un parlatore

Per la determinazione delle formanti viene utilizzato un algoritmo, ideato da Stephanie S. McCandless (1974) modificato da Burg, che utilizza la predizione lineare mediante polinomio interpolatore a numero di coefficienti elevato (normalmente si utilizzano da 10 a 16 coefficienti per il parlato a seconda del numero delle formanti che si desidera analizzare e della banda di frequenza utile per l'analisi formantica).

Il metodo viene definito LPC (Linear Predictive Code) ed è ampiamente utilizzato nell'analisi fonetica. La strumentazione utilizzata (Codice Praat®) consente di variare tale numero di coefficienti in funzione della frequenza di campionamento del segnale che viene stabilita dal dispositivo di registrazione (o di intercettazione) del segnale. Nell'ambito della presente perizia si utilizzano 10 poli formantici (larghezza temporale di 5 ms) in quanto vengono calcolate fino a cinque formanti, anche se ne verranno utilizzate solo le prime quattro. Un maggior numero di formanti non può essere calcolato in considerazione della banda telefonica e della frequenza di campionamento di solito compresa fra 8 e 11 kHz nella strumentazione di intercettazione utilizzate.

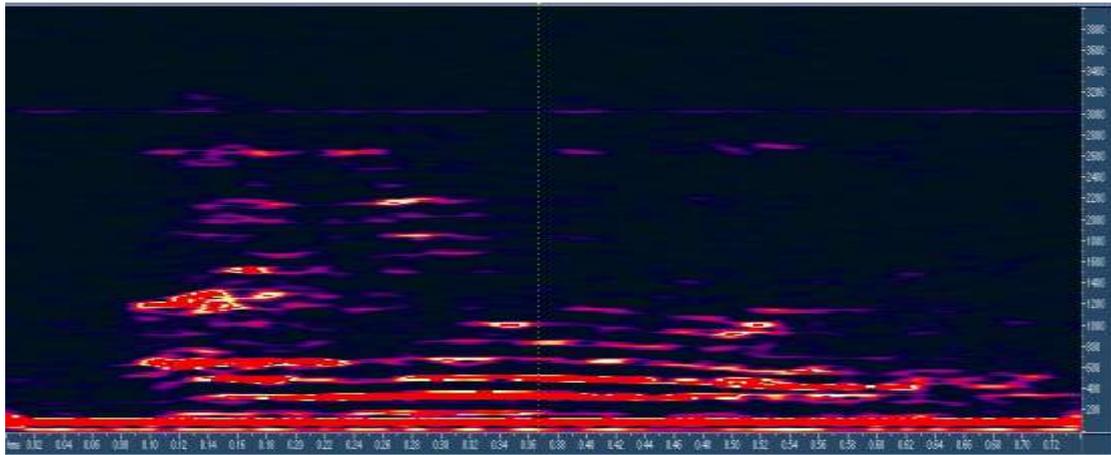


Figura 318: Spettrogramma della parola [AIUOLE] pronunciata da un parlatore

### 14.3. METODOLOGIA PER IL RICONOSCIMENTO DI UN PARLATORE

Questa tecnologia ha avuto origine più da sollecitazioni e necessità di indagini giudiziarie che scientifiche vere e proprie, anche se negli ultimi anni si sono manifestati interessi in settori applicativi quale, ad esempio, quello bancario e in genere nelle tecniche di rilievo delle presenze. Tuttavia nel corso di pochi anni si è riusciti a perfezionare diverse metodologie di analisi tutte tendenti ad individuare impronte fonetiche che possono essere considerate come un unicum per ciascun individuo. Purtroppo il linguaggio è di per sé un sistema di comunicazione complesso, articolato in unità elementari dette fonemi che possono a loro volta essere realizzati in diversi modi (foni o varianti del fonema). Le varianti dei fonemi possono essere individuali (ad esempio nella scelta arbitraria del parlatore tra /dz/<sup>41</sup> e /ts/ nella parola zucchero) oppure dipendere dal contesto in cui è inserito il fono (ad esempio le varianti combinatorie nasale [n] nella parola [angolo] realizzata con una velare [n] davanti all'occlusiva velare [g]). Le variazioni regionali possono essere considerate come varianti socio-linguistiche dei fonemi standard poiché dipendono dall'uso del dialetto del parlatore (prosodia).

Pertanto le varianti regionali sono considerate come varianti dei fonemi standard italiani quando sono comuni e come fonemi a sé stanti quando non presenti nella lingua standard. Il Siciliano è molto ricco di fonemi a sé stanti e il numero delle vocali attive è pari a ben nove contro le sette dell'Italiano Standard. Non si ritiene in questa sede (anche per la ricchezza dell'argomento e la finalità della presente relazione) di dovere esporre nel dettaglio le numerose teorie oggi seguite ma ci si limiterà a dare un accenno sul criterio di indagine utilizzato.

L'analisi dei fonemi (sia standard che regionali-dialettali) consente di evidenziare sequenze di formanti che dipendono, oltre che dal contesto globale della frase e dall'attività intraformantica del parlatore, anche e soprattutto dalle caratteristiche fisiche del parlatore e dalla sua prosodia. Nella figura successiva è rappresentato lo spettrogramma della parola [CIERTU] pronunciata da un parlatore al telefono.

<sup>41</sup> Si suole indicare il fonema fra // e le parole o le lettere fra [].

E' importante far presente che la trasmissione attraverso linea telefonica altera il segnale originario in quanto la banda passante<sup>42</sup> telefonica é standardizzata fra 300 e 3300 Hz e pertanto le figure riportano informazioni utili solo in quest'intervallo di frequenze.

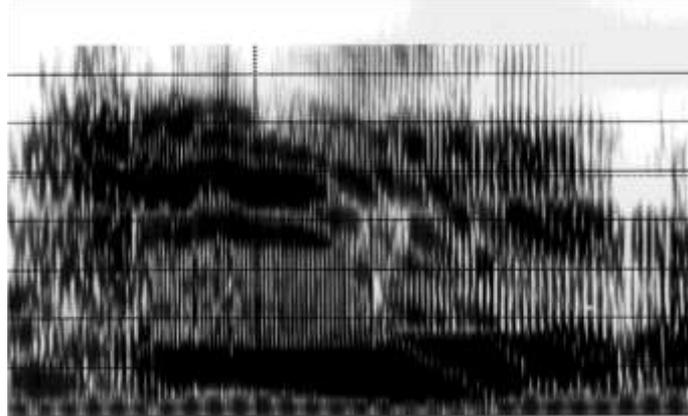


Figura 319: Spettrogramma della parola [CIERTU] pronunciata al telefono

Nella seguente figura é rappresentato l'analogo spettrogramma della stessa parola pronunciata dal sottoscritto CT attraverso un microfono direttamente sul dispositivo di analisi spettrografica.

Entrambi gli spettrogrammi sono stati ottenuti utilizzando la stessa apparecchiatura alla velocità di campionamento di 10 kHz. Si possono subito fare alcune osservazioni. Il segnale prelevato mediante telefono risulta più sporco a causa del rumore di fondo introdotto dalla linea telefonica. Le formanti (che si possono desumere dalla posizione delle zone più nere) sono chiaramente diverse nei due casi e ciò é evidentemente da addebitare al fatto che le voci esaminate sono diverse.

In secondo luogo lo spettrogramma di Figura 8 (pronunciato dal sottoscritto CT) é più ricco di armoniche superiori (tanto che in figura appaiono chiaramente tagliate) rispetto allo spettrogramma derivato dall'intercettazione telefonica.

Ciò é dovuto all'effetto della banda passante (già indicato fra 300 a 3300 Hz) della rete telefonica nazionale e pertanto le basse e le alte frequenze vengono eliminate.

L'insieme delle formanti, pur dipendendo dalla parola considerata, é anche funzione delle caratteristiche fonetiche del parlatore<sup>43</sup> e pertanto costituisce un insieme di valori di frequenze fortemente caratteristico dell'individuo.

---

<sup>42</sup> La *banda passante* é costituita dall'intervallo di frequenze che il dispositivo telefonico e la linea telefonica riescono a far passare. Una banda larga porta ad avere dispositivi e linee di trasmissione costose. Il segnale telefonico non é, quindi, mai fedele al segnale originale. Anzi si vengono a perdere spesso informazioni significative per la ricostruzione del segnale. E' grazie alla funzione di inferenza del nostro cervello che le informazioni mancanti vengono ricostruite e quindi il segnale trasmesso viene idealmente ricostruito sulla base di un riconoscimento di fonemi, sillabe e parole dal contesto. Chiaramente se il linguaggio non é noto tale riconoscimento risulta problematico e spesso impossibile.

<sup>43</sup> Si ricordi che le formanti dipendono dal sistema *laringe-glottide-esofago-bocca-lingua-labbra* di ciascun individuo. Esse sono, in pratica, le frequenze proprie di risonanza di questo sistema acustico-fisiologico così come esso viene ad elaborare il segnale vocalico esaminato.

La metodologia di indagine é consistita nella ricerca minuziosa di fonemi caratteristici del parlatore all'interno dei brani indicati dal GIP (citati in precedenza) e nell'individuazione delle formanti fondamentali per ciascuno di essi.

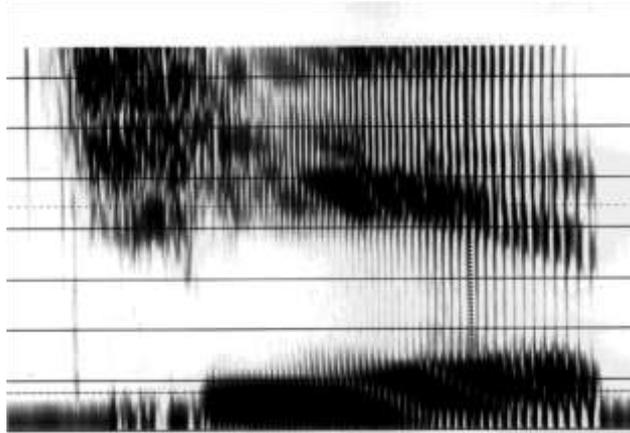


Figura 320: Spettrogramma della parola [CIERTU] pronunciata dal CTU

E' opportuno sottolineare che l'analisi formantica sopra brevemente descritta non é di facile attuazione sia per la qualità, spesso non buona, dei brani messi a disposizione per l'indagine che per le variazioni sia del parlatore (in genere dovute all'uso di dialetti, alla prosodia, allo stato d'animo, ...) che del contesto stesso del brano in esame.

Inoltre l'utilizzo di telefoni cellulari del tipo GSM influenza non solo la banda passante ma anche la conformazione spettrale a causa della codifica (effettuata mediante encoder sul terminale portatile) e successiva decodifica (effettuata mediante decoder) operata sui suoni trasmessi. La formazione delle formanti di una [e] dipendono oltre che dal fonema esaminato anche dalla successione di fonemi nel brano esaminato (prosodia) per cui, ad esempio, si hanno valori diversi in [CIERTU] e in [SPERTU]. A tale scopo basta osservare che le vocali presenti nell'italiano standard sono 5 (pentavocalico) con 7 varianti (aperte, chiuse, atoni, toniche, ...) mentre il siciliano si può considerare, come già accennato, *eptavocalico* con 9 varianti. Senza contare i fonemi presenti nel dialetto che presentano caratteristiche uniche anche per zone o paesi o città della Sicilia.

E' possibile, così, catalogare, mediante l'analisi prosodica, in base alle varianti fonetiche e prosodiche le varie comunità dell'Isola in modo da distinguere gruppi e sottogruppi di appartenenza del parlatore.

## 14.4. QUALITÀ DEI SEGNALI ACUSTICI

Qualunque tipologia di analisi si segua per l'identificazione del parlatore occorre sempre accertare che il segnale su cui si effettuano le analisi sia qualitativamente accettabile ed affidabile, nel senso che contenga le informazioni elementari del soggetto che lo ha prodotto e che ad esso possa essere attribuito con ragionevole certezza.

Se, ad esempio, si registra un campione fonico mediante un'apparecchiatura che distorce il segnale introducendo un particolare rumore a determinate frequenze o attenuando il segnale in corrispondenza di certi intervalli di frequenza o modificandolo per effetto di una funzione di trasferimento<sup>44</sup> non corretta allora l'analisi del segnale registrato ben difficilmente può portare a

<sup>44</sup> Consideriamo un'apparecchiatura di registrazione come una scatola nera alla quale viene inviata in ingresso il segnale originale. In uscita si otterrà un segnale che é il prodotto, alle varie frequenze, del segnale di ingresso per la funzione di

determinare i valori delle formanti attribuibili al parlatore originario. Vediamo con alcuni esempi quanto appena affermato. In figura seguente si ha un segnale costruito come somma di cinque armoniche avente frequenza fondamentale di 500 Hz e frequenze multiple di 1000, 1500, 2000, 2500 Hz. In definitiva il segnale sonoro (simile ad un *beep*) é dato dalla somma, istante per istante, delle ordinate delle cinque armoniche. Lo spettro in una sezione a segnale non nullo (in particolare in corrispondenza dei due marcatori triangolini gialli a circa 1/3 della finestra) é riportato nella Figura 10. In essa sono ben visibili 5 picchi alle frequenze corrispondenti alle armoniche costituenti il suono di figura e pertanto l'analisi spettrale risulta fedele.

Supponiamo ora di operare alcune modifiche del tipo di quelle normalmente riscontrate nelle operazioni di trasmissione tramite linea telefonica e di registrazione su nastro. Se filtriamo il segnale originale con un filtro passante su banda telefonica (300-3300 Hz) si ha il segnale riportato in figura successiva.

Sono ancora ben visibili e cinque frequenze (queste sono tutte comprese all'interno della banda passante telefonica) anche se si può osservare un rumore di fondo. In questo caso si può affermare che il segnale filtrato dal telefono é ancora fedele e l'analisi spettrale effettuata su di esso é affidabile. Si osservi, però, che il caso qui presentato é da considerarsi ottimale poiché tutte le frequenze del segnale esaminato risultano all'interno della banda passante telefonica.

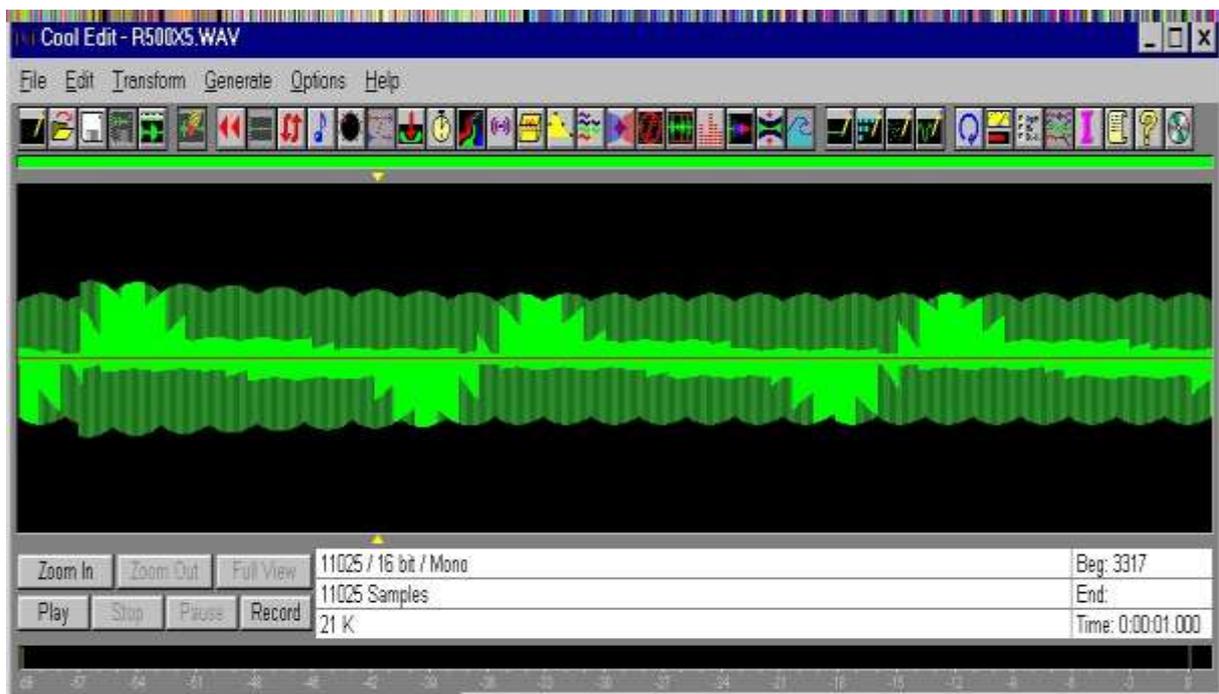


Figura 321: Oscillogramma di un suono di sintesi a cinque frequenze

Per evidenziare meglio l'effetto della banda telefonica si osservi il segnale complesso di figura successiva: esso é composto da cinque onde quadre aventi frequenze di 200, 400, 600, 800, 1000 Hz (il suono prodotto é simile a quello di un clacson). Le onde quadre hanno uno spettro di frequenze che si estende a tutti i multipli della frequenza fondamentale quindi si ha uno spettro a righe che si estende all'infinito. In Figura 13 é riportato lo spettro del segnale precedente fra le frequenze 0 e 5500 Hz.

---

trasferimento del dispositivo. Se idealmente questa funzione di trasferimento fosse unitaria si avrebbe la coincidenza del segnale di uscita con quello di ingresso. Ma se questa funzione ha un andamento *parabolico* il segnale di uscita risentirà dell'azione di filtraggio *parabolico* del dispositivo.

Sono visibili le righe spettrali che si estendono fino al limite della finestra (corrispondente a 5500 Hz poiché la frequenza di campionatura é stata scelta 11000 Hz) ma che vanno ben oltre questo limite.

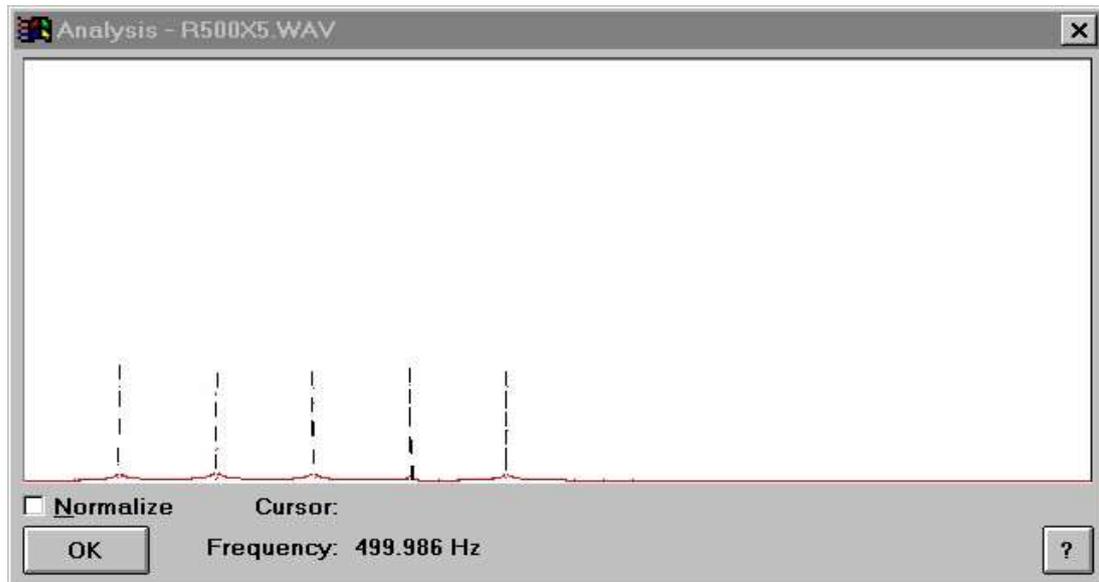


Figura 322: Sezione spettrografica del suono a 5 armoniche

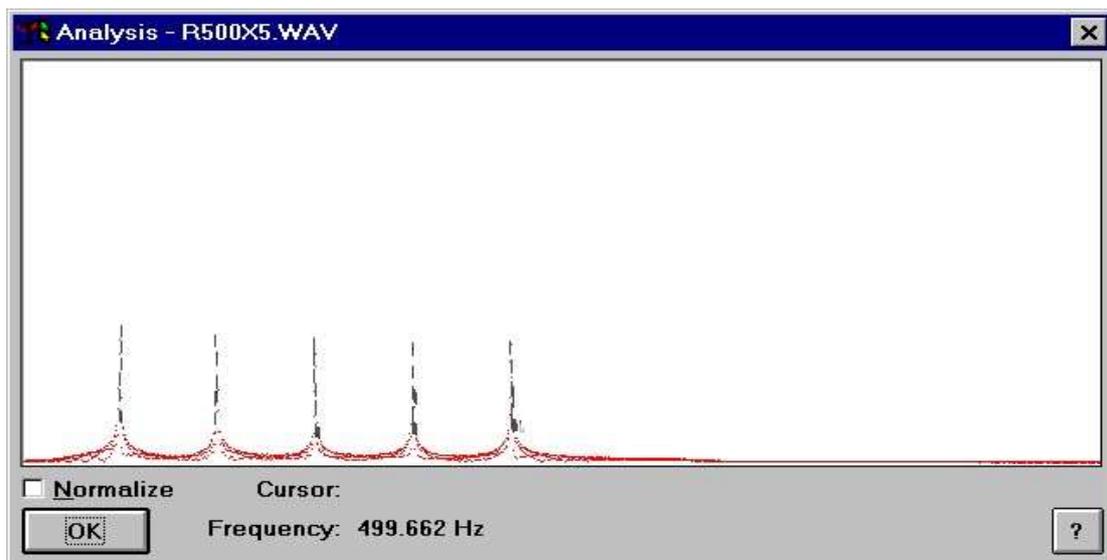


Figura 323: Sezione spettrografica del segnale filtrato su banda telefonica

Adesso filtriamo su banda telefonica (300÷3300 Hz) questo segnale: otteniamo l'oscillogramma di figura nel quale si possono osservare le singole onde non più squadrate, come in Figura. Tutte le righe corrispondenti a frequenze superiori a 3300 Hz sono scomparse, come si può vedere da un facile confronto con la figura. Lo spettrogramma di questo nuovo segnale é riportato in figura successiva ove si osserva come le onde quadre sono state modificate (azione di filtraggio) dalla rete telefonica.

E' chiaro che se oltre i 3300 Hz ci sono informazioni utili per il riconoscimento del segnale queste sono state definitivamente perse. Questo stesso fenomeno accade tutte le volte che la voce viene inviata sulla linea telefonica o ricevuta e registrata tramite linea telefonica.

A peggiorare le cose va aggiunto che anche il microfono introduce altre distorsioni e non si é può mai dire a priori quali queste possono essere poiché ogni apparecchio telefonico, anche della stessa casa costruttrice, può avere una funzione di trasferimento diversa dalle altre.

Se questa funzione di trasferimento ha banda passante inferiore a quella standard telefonica allora l'effetto sopra descritto si aggrava.

Spesso si possono avere attenuazioni particolari in corrispondenza di certe frequenze: in questo caso si ha un'attenuazione delle linee dello spettro. In altri casi si può avere l'immissione di rumore elettronico con conseguente comparsa di picchi nello spettrogramma che non possono eziologicamente ricondursi al parlatore.

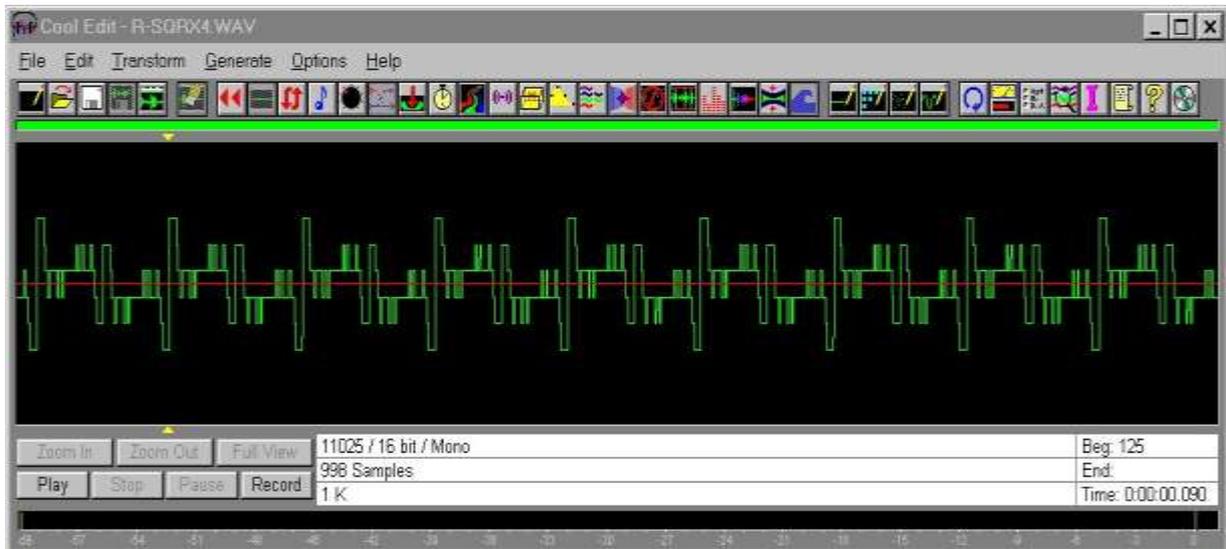


Figura 324: Segnale composto da quattro onde quadre di 200, 400, 600, 800 e 1000 Hz

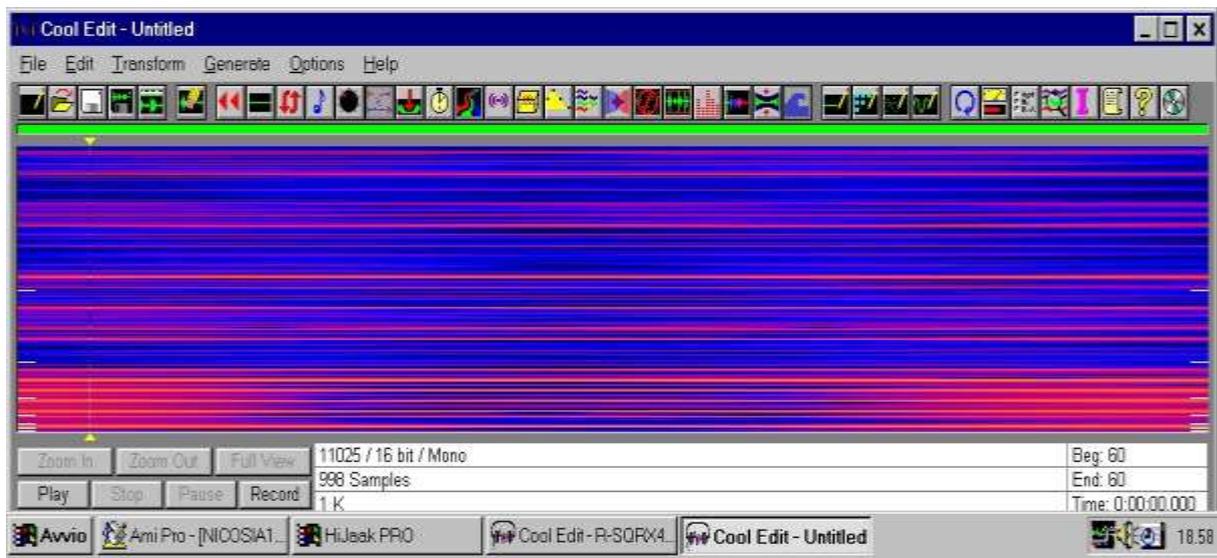


Figura 325: Spettrogramma del segnale composto di 5 onde quadre

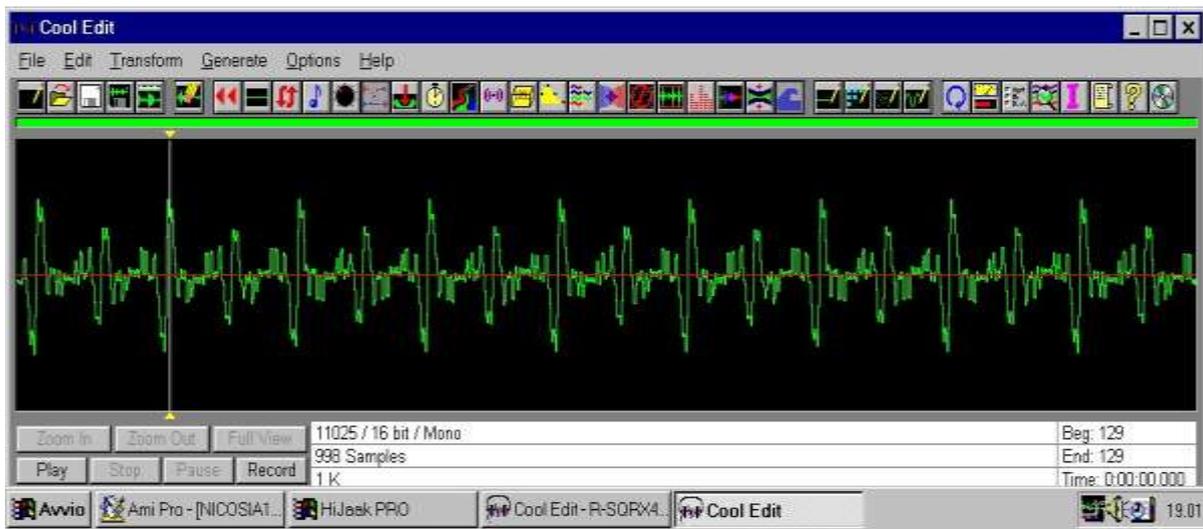


Figura 326: Segnale a cinque onde quadre filtrato su banda telefonica

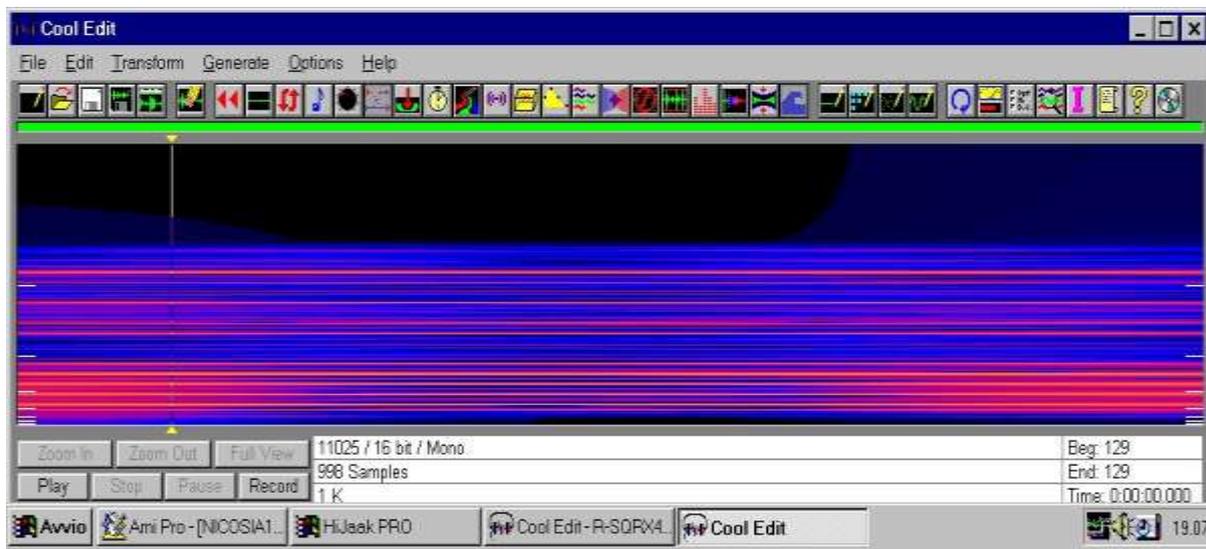


Figura 327: Spettrogramma del segnale a onde quadre filtrato su banda telefonica

A completare la catena di trasmissione e rilevazione del segnale vi è il registratore. Questo introduce, a sua volta, disturbi per effetto di rumore elettronico interno o di attenuazione di bande a causa del dispositivo di sincronizzazione telefonica.

Vi può ancora essere la possibilità che il segnale registrato vada in saturazione, cioè che la sensibilità del canale di ingresso sia elevata al punto da mandare fuori intervallo massimo l'ampiezza del segnale stesso.

Vediamo questo effetto utilizzando il segnale a cinque armoniche di Figura precedente ma con amplificazione tale da mandare in saturazione il dispositivo di registrazione, come rappresentato in figura seguente.

Si può osservare che le onde sono squadrate (o, come si suol dire in gergo, tagliate) superiormente: il segnale tende ad andare fuori scala rispetto alla finestra di visualizzazione che è anche rappresentativa della massima ampiezza del segnale che può essere rilevato dal registratore senza andare in saturazione.

Lo spettro in corrispondenza della sezione indicata dai due triangolini gialli (circa a 40% della finestra) è riportato in figura seguente.

Sono ancora visibili i primi cinque picchi corrispondenti alle frequenze delle armoniche componenti del segnale ma se ne sono aggiunti altri (ben cinque visibili ed un sesto appena

accennato, senza contare i picchi di frequenze superiori che ricadono fuori scala rispetto alla finestra considerata).



Figura 328: Oscillogramma del segnale a 5 armoniche con sovrassaturazione

In pratica il segnale che è andato in saturazione presenta onde quadrate che introducono un numero teoricamente infinito di frequenze spurie, come nel caso del segnale di Figura. In definitiva quando il segnale è tale da saturare il dispositivo di registrazione allora l'analisi spettrale non è più fedele poiché vengono introdotte altre informazioni non presenti nel segnale originario. In una situazione complessa quale lo spettrogramma di un segnale fonico saturo è difficile o addirittura impossibile stabilire quali sono le informazioni vere e quali quelle aggiuntive per effetto dell'*overloading* e pertanto l'analisi di questi segnali può, in linea generale, non essere fedele ed affidabile.

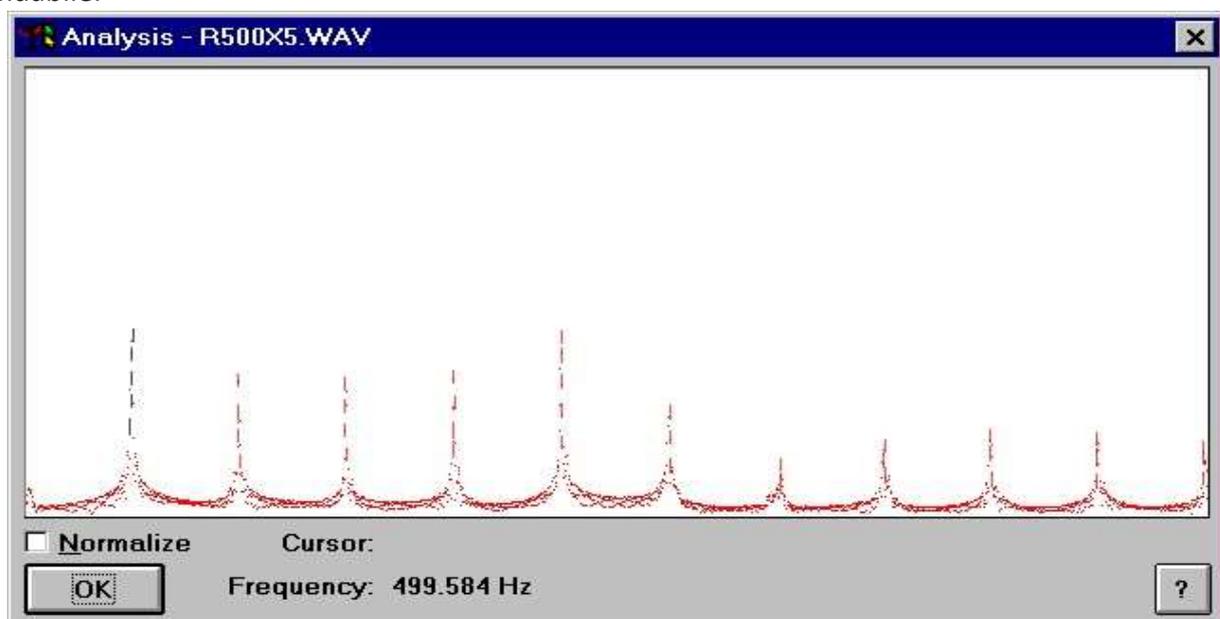


Figura 329: Sezione spettrografica del segnale sovrassaturo

## 14.5. LO STRUMENTO DI ANALISI FONOMETRICA

L'attuazione dell'analisi formantica precedentemente descritta richiede una quantità notevole di calcoli e può essere effettuata solo mediante sofisticati programmi elettronici e con computer di elevata potenza. Il software utilizzato nella presente consulenza è il *Praat*<sup>®</sup> versione 4.2.07 rilasciata il 16/06/2004. Si tratta, in breve, di un software altamente specializzato per l'analisi formantica. Si hanno finestre di visualizzazione dei dati in forma grafica e numerica, routine di calcolo delle formanti (analisi *LPC*) e dello spettrogramma, routine statistiche per il calcolo della frequenza fondamentale (detta *pitch*<sup>45</sup>) che può essere evidenziata nella finestra di analisi (spettrogramma).

Si ha, inoltre, la possibilità di intervenire sull'oggetto di esame (onda sonora) mediante due modalità fondamentali: nella prima si seleziona il segmento da editare (ascoltare, tagliare, spostare, copiare, salvare, ...) mediante il cursore azionato dal mouse del computer; nella seconda si ha la stampa delle prime quattro formanti del segmento analizzato con la finestra di selezione. La finestra di selezione delimita l'inizio e la fine della finestra di analisi di un segmento dell'onda sonora. A ciascun marcatore può essere associata una o più finestre di analisi acustica che può contenere (ovvero visualizzare) risultati in funzione del tipo di analisi selezionata (*LPC*, spettro a banda stretta, *pitch*, *jetter*, ...). Oltre alla finestra principale che contiene l'oggetto da analizzare (solitamente l'oscillogramma di un suono) si ha anche una finestra secondaria nella quale l'onda visualizzata nella prima finestra può essere analizzata interamente mediante strumenti matematici complessi.

In particolare è possibile effettuare analisi frequenziali di vario tipo con la possibilità di una piena e totale configurazione delle ipotesi di calcolo (range, intervallo di frequenze, *smoothing*, *preenfas*<sup>46</sup>, ...) ovvero anche rappresentare, unitamente allo spettrogramma dell'onda principale, l'andamento di una o più formanti (solitamente rappresentate da punteggiate). In questa finestra secondaria viene effettuata gran parte dei calcoli necessari all'analisi acustica vera e propria. La possibilità di sezionare l'onda sonora in un particolare istante mediante finestre e di visualizzare le analisi nelle finestre dedicate fornisce un ulteriore formidabile strumento di analisi di dettaglio. Componendo le finestre di visualizzazione dei dati con gli strumenti di analisi associati alla finestra e a sottoprogrammi specializzati in compiti particolari (alcuni sono direttamente forniti in libreria dal *Praat*<sup>®</sup> mentre altri possono essere scritti ad hoc per lo strumento che si intende costruire) si ottiene uno strumento di analisi personalizzato ed estremamente potente per l'analisi acustica dei suoni complessi.

---

<sup>45</sup> **Frequenza Fondamentale (F0):** essa corrisponde, in pratica, alla frequenza di vibrazione delle corde vocali. Questa vibrazione appare come una componente periodica della voce: naturalmente la (F0) può essere valutata solamente durante i tratti "voiced" e può essere determinata con la tecnica della misura dell'autocorrelazione o con un algoritmo di "peak-picking". Molto comodo è pure il metodo del *Cepstrum*. La tecnica di autocorrelazione è, in genere, la più usata (vedi *Rabiner & Schafer* in *Digital Processing of Speech Signals*) e si serve di una dimensione di *frame* posta uguale al minimo periodo accettabile. Un algoritmo di *peak-picking* calcola la frequenza fondamentale individuando i singoli cicli del segnale. Questa tecnica è ampiamente descritta in *Gold*, "Computer Program for Pitch Extraction." *JASA*, 34(7). L'algoritmo genera una sequenza di valori di *pitch*, un valore per ciascun periodo di *pitch*, e le variazioni di *pitch* si riflettono in una sequenza di numeri spazati irregolarmente nel tempo.

<sup>46</sup> 6 dB Pre-Emphasis: In *Praat*<sup>®</sup> è disponibile un'opzione di 6 dB pre-emphasis. Quando si abilita tale opzione il segnale viene enfatizzato alle frequenze più alte prima di essere analizzato semplicemente applicando una derivata punto-punto sul segnale. Ovviamente ciò viene fatto solamente sul calcolo lasciando inalterato il segnale originale. La procedura consente di "amplificare" le frequenze alte con una pendenza di 6 dB/ottava e viene usata essenzialmente per l'analisi della voce dove occorre evidenziare fenomeni su frequenze che vengono naturalmente "comprese".

Nella seguente figura si riporta la formazione dello strumento “*Analizzatore Formantico*” utilizzato per consulenze tecniche di comparazione fonica. In esso sono visibili varie sezioni (pulsanti) qualitativamente descritte in precedenza e la finestra Info, vedi figura successiva, nella quale sono trascritti i risultati dell’analisi LPC<sup>47</sup>.

Sul bordo destro dello strumento virtuale si hanno una serie di bottoni operativi ciascuno dei quali effettua un compito assegnato da sottoprogrammi appositamente predisposti.

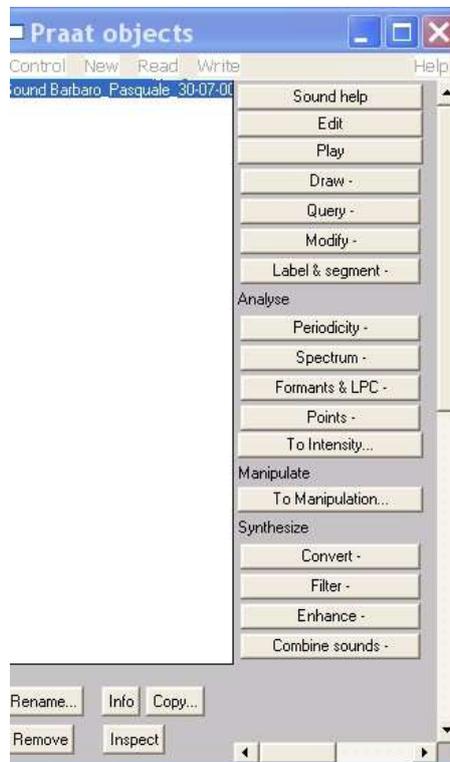
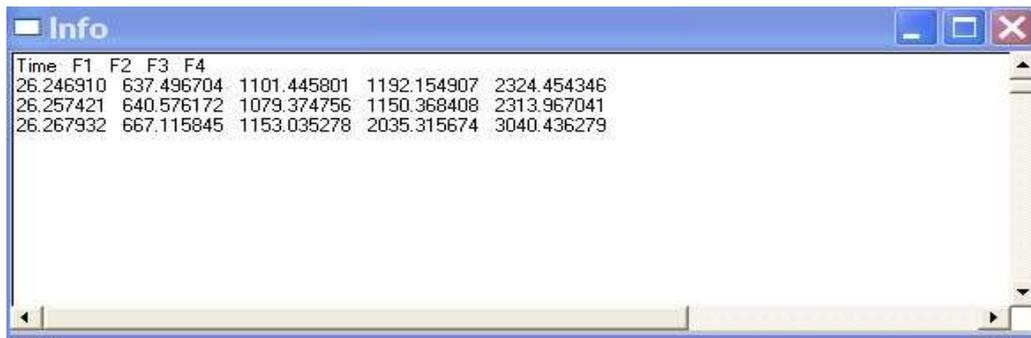


Figura 330: Consolle di comando del software di analisi formantica

<sup>16</sup> <sup>47</sup> **Codici di Predizione Lineare (LPC):** Un grafico di *LPC* mostra una stima della funzione di trasferimento del tratto vocale, come livello verso la frequenza e mette in evidenza le cosiddette formanti rappresentate dai picchi dell'*LPC*. Il grafico si ricava da una serie di coefficienti *LPC* calcolati mediante il metodo auto correlazione (con una finestra rettangolare), anche noto come metodo recursivo di *Durbin* (vedi *Rabiner & Schafer*). La lunghezza del frame viene specificata nella finestra di dialogo di *LPC Setup*. La ragione per cui si chiamano codici di predizione lineare è che i coefficienti che appaiono nella funzione di trasferimento hanno il significato di una stima fatta a priori: fornendo i più recenti punti  $y_{n-p}, y_{n-p+1}, \dots, y_{n-1}$  di un segnale vocale, si possono calcolare i valori stimati  $y'_n$  del punto successivo  $y_n$ , come segue:  $y'_n = a_1 y_{n-1} - a_2 y_{n-2} - \dots - a_p y_{n-p}$  come dire che  $y'_n$  è una combinazione lineare dei punti che lo precedono. La differenza tra il valore attuale e quello stimato dal predittore costituisce una sequenza di errore del predittore  $e_n$ , definita come  $e_n = y_n - y'_n$ , e conosciuta anche come residuo (*residual signal*). Oltre a misurare l'errore del calcolo della predizione, la sequenza può essere vista come una sorgente vocale che pilota il tratto vocale e che si trasforma in voce per effetto della funzione di trasferimento  $H(z)$ . La scelta ottimale per il numero dei coefficienti *LPC* dipende molto dalla velocità di campionamento del segnale. Tutte le analisi di *Praat*® che fanno uso dell'*LPC* consentono di scegliere un numero di coefficienti di default secondo la seguente formula (vedi *Rabiner and Schafer*): *Numero dei Coefficienti* = (*Sample rate in kHz*) + 3. In ogni caso il numero dei coefficienti può essere stabilito dall'utente. In generale, un maggior numero di coefficienti consente di risolvere formanti o comunque picchi, molto accoppiati tra di loro ma può anche introdurre errori nella misura. I valori forniti per default vanno generalmente bene per la voce maschile; la voce femminile e quella dei bambini richiedono un maggior numero di coefficienti.



Time	F1	F2	F3	F4
26.246910	637.496704	1101.445801	1192.154907	2324.454346
26.257421	640.576172	1079.374756	1150.368408	2313.967041
26.267932	667.115845	1153.035278	2035.315674	3040.436279

Figura 331: Finestra di informazione dei valori delle formanti selezionate

Lo strumento operativamente predisposto alle operazioni di analisi fonetica appare come riportato in figura seguente.

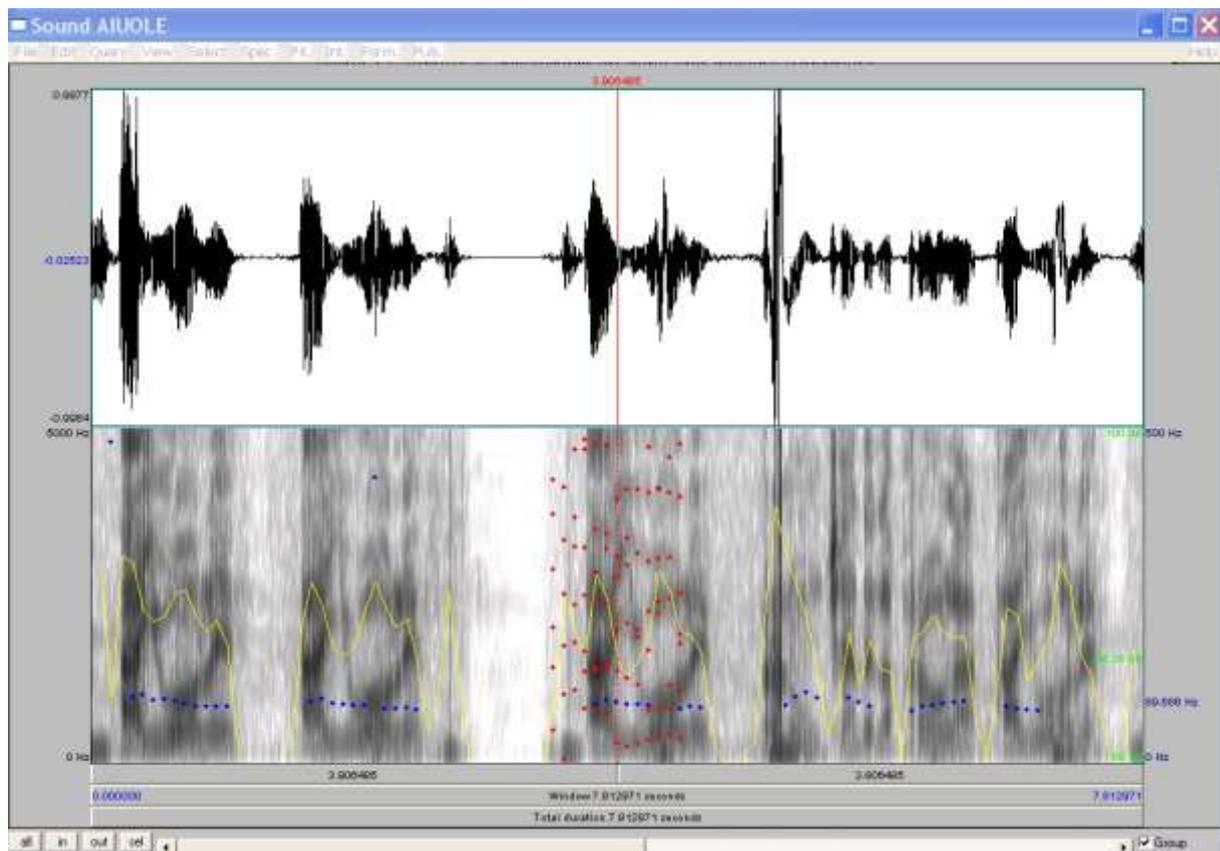


Figura 332: Strumento di Analisi formantica pronto all'uso

### 14.5.1. USO DI SOUNDSCOPE®

Lo strumento operativamente predisposto alle operazioni di analisi fonetica appare come riportato in figura. Le finestre prima descritte sono dotate di proprietà specifiche a seconda del compito da svolgere. In alcune di esse si hanno riferimenti temporali (quadrantini), in altre riferimenti frequenziali. Si osservi che SoundScope® è essenzialmente un insieme di librerie di strumenti che possono essere assemblate per fornire un insieme determinato di opzioni di calcolo. Quello indicato in figura è stato studiato per l'analisi fonetica.

In corrispondenza del bordo destro di ciascuna finestra si hanno alcune linguette che consentono di personalizzare quanto la finestra è in grado di visualizzare.

Ogni proprietà può essere programmata e variata mediante sofisticati programmi di configurazione che *SoundScope*<sup>®</sup> mette a disposizione nell'ambiente di sviluppo appena descritto.

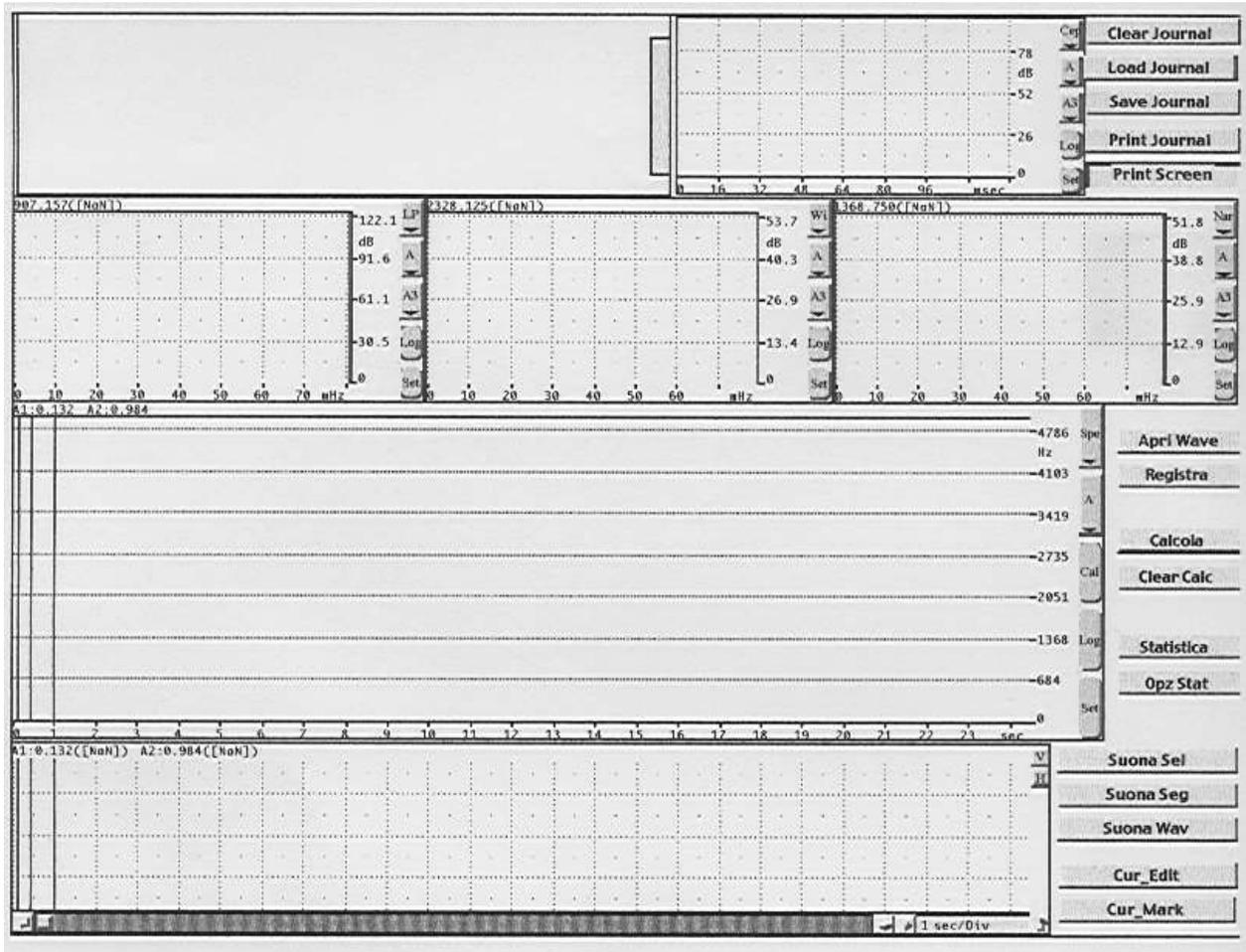


Figura 333: Strumento SoundScope<sup>®</sup>

Dai brani forniti per l'analisi, ripuliti<sup>48</sup> dai suoni spurei e non strettamente correlati alla voce da analizzare, sono stati prelevati numerosi campioni fonici di ridotte dimensioni della voce del parlatore (frasi), ciascuno contenente poche parole dalle quali determinare i vettori formantici (insieme delle prime cinque formanti, qualora rilevabili) delle vocali [a], [o], [i], [e], [u] sia atoni che toniche.

Nella determinazione delle formanti principali e al tempo stesso per tener conto degli effetti della saturazione (ove presente) delle registrazioni si è proceduto al confronto multiplo dei dati ottenuti tramite: *linear predicting code (LPC)* che cerca di determinare mediante l'algoritmo di *Stephanie-McCandless* le formanti principali mediante polinomio interpolatore; spettro a banda larga della sezione di misura (20 ms); spettro a banda stretta della sezione di misura (20 ms); analisi *CEPSTRUM* della sezione di misura (10 ms).

<sup>48</sup> A causa dei rumori di fondo e/o dei problemi di sovrassaturazione si hanno spesso campioni difficilmente analizzabili perché affetti da errori di calcolo determinati dal metodo LPC. In pratica può accadere che due formanti si uniscano perché troppo larghe o perché è presente qualche riga di rumore. In questo caso, specialmente alle basse frequenze, la F1 e la F2 spesso danno luogo ad una formante unica che non è correlabile con la fonetica del parlante ma è un errore di calcolo matematico strumentale. In questo caso questi segnali vanno eliminati per evitare di compromettere la statistica delle ellissi formantiche e tutta la comparazione fonica.

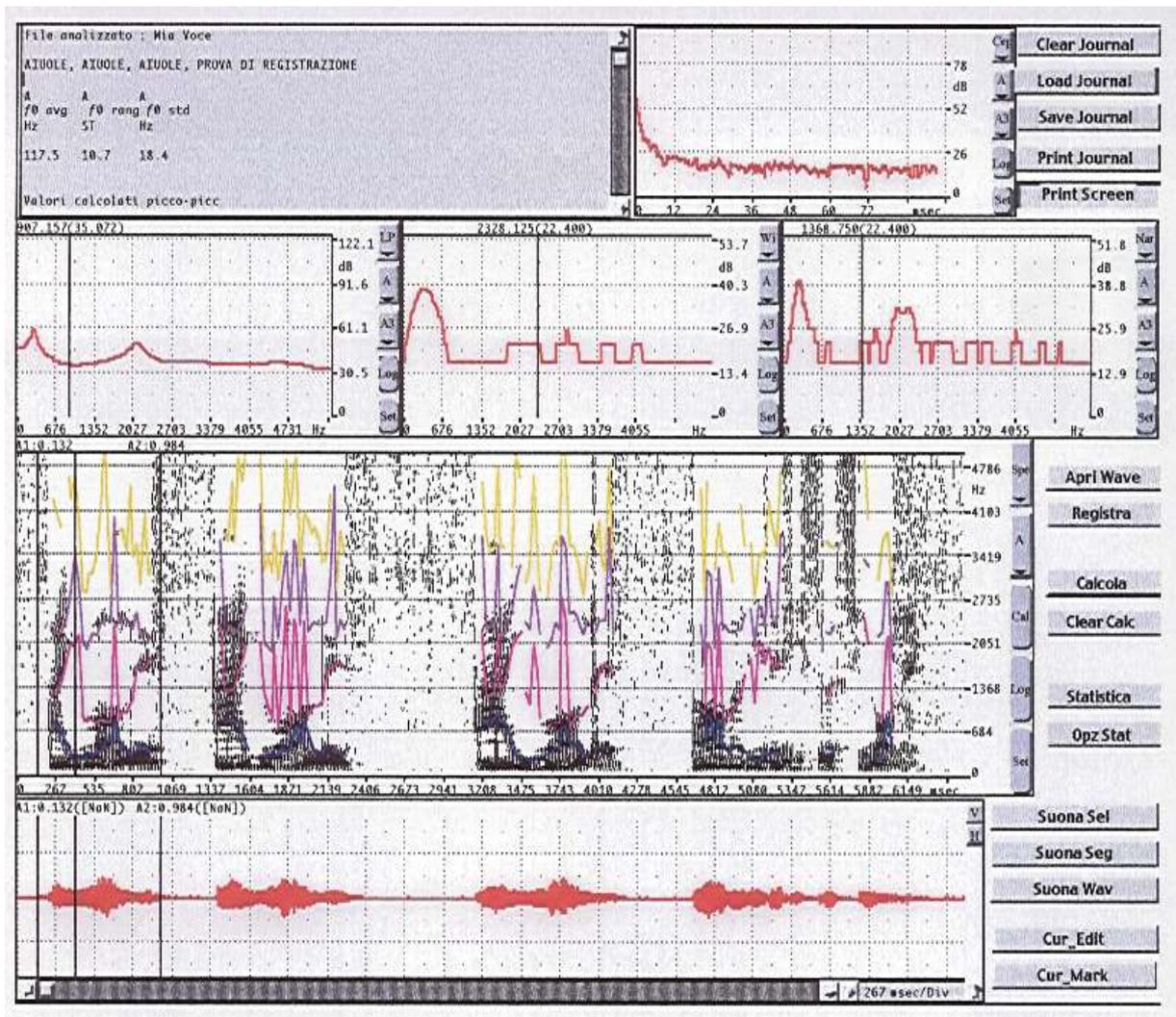


Figura 334: Strumento SoundScope® in operazione

E' possibile osservare in figura come dall'oscillogramma in basso si determini lo spettrogramma (con le linee delle formanti F1, F2, F3 ed F4), oltre che l'analisi CEPSTRUM e l'analisi statistica.

## 14.6. METODO DELLE ZONE DI ESISTENZA

L'analisi formantica è piuttosto complessa anche a causa di una forte variazione formantica dovuta alla fonazione dei soggetti esaminati. Pertanto si è adottato il criterio delle *zone di esistenza* poiché la discriminazione delle vocali non dipende strettamente dal valore assoluto della frequenza di ciascuna formante bensì dalla configurazione d'insieme delle formanti.

Infatti i valori di ciascuna formante di una data vocale variano entro determinati limiti, detti *ellissi formantiche*, che possono differire anche di molte decine di hertz per le emissioni sonore di uno stesso parlatore.

Tale diversità è tipica della fonazione in contesti e in momenti di fonazione diversi.

Nella figura seguente si hanno le ellissi formantiche di due campioni di voce (di solito uno riferito al parlatore noto e l'altro a quello incognito da identificare) per la vocale *i* tonica. La comparazione va fatta per ciascuna vocale (tonica e atona) confrontando le ellissi formantiche dei campioni analizzati.

## CONFRONTO ZONE DI ESISTENZA PER I-TONICA

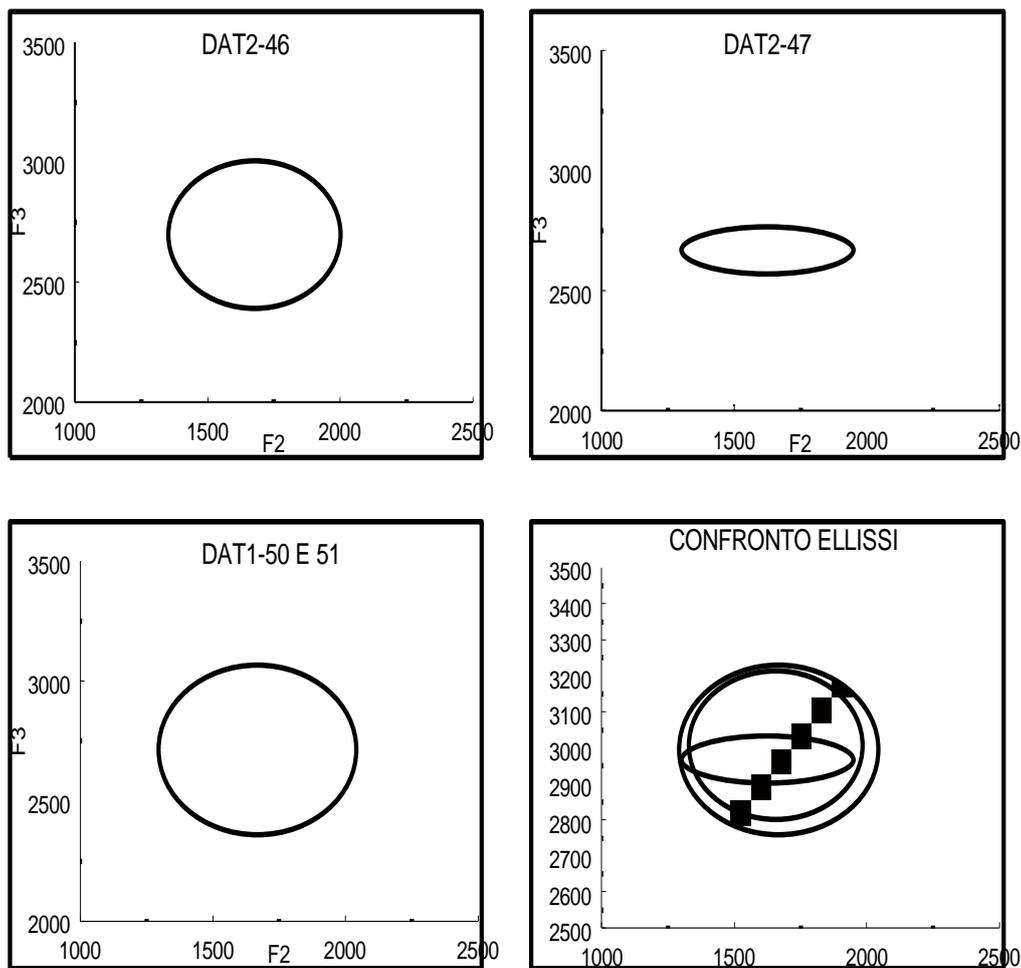


Figura 335: Zone di esistenza per la vocale I tonica

## 14.7. CONFRONTO SUI METODI PER IL RICONOSCIMENTO DEL PARLATORE

Esistono vari metodi per il riconoscimento del parlatore. Di solito questo problema è tipico dell'Acustica Forense e scaturisce dalla necessità di volere riconoscere l'identità di un parlatore mediante confronto con campioni noti.

Storicamente l'identificazione era effettuata mediante un confronto uditivo: un gruppo di persone ascoltavano due campioni fonici e giudicavano se erano riferibili allo stesso soggetto o non. Questo metodo si fonda solamente sulla capacità di confronto dell'Uomo, non ha una base scientifica e può spesso dar luogo ad errori.

L'altra via utilizzata ed oggi preferita è quella di utilizzare gli spettrogrammi e l'analisi formantica, come sopra indicata.

Acusticamente esistono molti parametri che possono essere usati per comparare le voci. La scelta è determinata da una approfondita analisi linguistica. Non esistono parametri ideali ma solo alcune indicazioni:

- mostrare una alta variabilità interparlatore e una bassa variabilità intraparlto;

- b) essere resistente al camuffamento
- c) avere una alta frequenza di occorrenza
- d) essere robusto durante la trasmissione
- e) essere relativamente facile da estrarre e misurare.

### 14.7.1. METODO DEL RICONOSCIMENTO Uditivo

Il test deve essere sottoposto ad un campione di ascoltatori di almeno 50 unità. Gli ascoltatori, di età media compresa tra i 18 e i 35 anni, sono provenienti dalle province sia del sospettato che delle voci anonime (ovviamente questo prevede una analisi dialettologica preventiva)

Nessuno dei soggetti su specifica richiesta soffre o ha sofferto di disturbi di tipo uditivo tali da inficiare le risposte fornite durante il test.

Modalità e luogo di esecuzione del test

Il test si svolge all'interno di una camera silente o anecoica. Le registrazioni del test devono essere riprodotte in modalità stereofonica con sorgente sonora frontale. Il test viene condotto in presenza di un operatore con funzioni di supervisore e coordinatore del test stesso.

Prima di sottoporre il test agli ascoltatori, agli stessi vengono fatte alcune premesse per un corretto svolgimento delle operazioni di valutazione loro richieste. Nello specifico viene loro illustrata brevemente la prova da svolgere:

Dare una risposta secondo la tabella che segue soffermando l'attenzione solo ed unicamente sulla somiglianza o meno delle voci ascoltate.

ETA' _____	SESSO: M ♀ ♀			PROVENIENZA _____	
	<b>Scala di giudizio</b>				
	<b>NO</b>				<b>SI</b>
<b>Set confronto</b>	<b>0%</b>	<b>25%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>
<b>1</b>					
<b>2</b>					
<b>...</b>					

Figura 336: Esempio di scheda di confronto

Il test deve essere così composto:

- 20 set di confronto, relativi alla comparazione tra il saggio fonico e le voci anonime;
- 10 set di confronto, relativi alla comparazione tra le voci anonime;
- 10 set di confronto, relativi alla comparazione tra le voci note;

- 10 set di controllo di cui con risposta “no” e con risposta “si”.  
Vengono accettati e utilizzati al fine della comparazione uditiva solo quei test che superano il set di controllo con almeno 25 risposte corrette su 30.  
Solo alla fine il risultato ottenuto, frutto di una analisi soggettiva, avrà valore scientifico.

#### 14.7.2. METODO BASATO SU VOICEPRINT IDENTIFICATION

E' stato proposto nel 1962 da Kersta ed ancora utilizzato in molti paesi. Si basa sull'identificazione di brani particolari che presentano forti analogie spettrometriche.

Si sono affermati anche metodi misti, acustici ed uditivi, combinando le due tecniche. Va tuttavia considerato che:

- non tutti hanno la stessa abilità (Ladefoged and Ladefoged 1980:45; Hollien 1995:15, Foulkes and Barron 2000:182)
- alcune voci sono più facilmente identificabili (Popçun et al. 1989, Rose and Duncan 1995:12,16)
- altre voci sono più simili tra loro rispetto ad altre.
- più si ascolta una voce più questa diventa familiare e quindi più facilmente identificabile (Ladefoged and Ladefoged 1980:49)
- più una voce è familiare più è facile capirla anche in contesti rumorosi.
- a volte la familiarità della voce sembra facilitare il compito invece...

Alcuni esperimenti mostrano che nell'ascolto di una sola parola l'errore è del 69%, lo stesso scende al 34% con una frase e al 17% con ascolti di 30 sec. (Rose 2002:102)

La distanza tra gli ascolti incide nella precisione del riconoscimento:

- Errore del 50% dopo 10 minuti. 57% dopo un giorno, 61% dopo 7 giorni, 68% dopo 15 gg.
- Competenza della Lingua o dialetto sia nel confronto sia conoscenza da parte dell'ascoltatore.

Sul riconoscimento visivo si hanno alcune osservazioni critiche:

- Il riconoscimento della voce e il riconoscimento visivo interessano differenti parti del cervello (cfr. Blakemore 1977:161-4)
- L'emisfero destro viene utilizzato per il riconoscimento dei volti e l'emisfero sinistro per le voci.
- Inoltre dipende anche se le voci sono familiari. Le voci familiari vengono riconosciute dall'emisfero destro come i volti.
- Al momento attuale il metodo uditivo non utilizza un metodo analitico ma più che altro intuitivo
- Non ci sono evidenze nell'esaminatore o caratteristiche numerabili
- Non si conoscono gli elementi minimi della comparazione (Hollien 1990:215)
- Come può la voce essere discriminata con questo metodo?
- Utilizza parametri qualitativi o quantitativi? (Aitken 1995:14-15)
- I dati di partenza sono differenti.
- Non basta parlare di contorni formantici.
- Bisogna definire una serie di passi attuabili da qualunque laboratorio e che conducano allo stesso risultato.

## 15. CONTROLLO DEL RUMORE NEGLI IMPIANTI

Una delle sorgenti di rumore presente nella vita quotidiana di tutti Noi è quella dovuta agli impianti tecnologici. Per effetto delle normative sopra descritte la rumorosità prodotta dagli impianti dà luogo a un elevato numero di contenziosi giudiziari. In questi casi l'applicazione del criterio del rumore differenziale porta quasi sempre alla condanna del proprietario delle macchine rumorose e all'obbligo di sostituirle con altre meno rumorose. Oggi il rumore comincia ad entrare come criterio di progettazione impiantistica, ad esempio, per la selezione dei componenti di impianto (unità refrigeratrici, bocchette e/o diffusori, UTA, ...) come pure per il dimensionamento delle reti tecnologiche (idroniche ed aerauliche).

### 15.1. METODOLOGIE DI CALCOLO DELLA RUMOROSITÀ DEGLI IMPIANTI

Già nei capitoli precedenti si sono indicate le relazioni necessarie per il calcolo dei livelli sonori prodotti da varie sorgenti.

Seguono nel prosieguo alcune applicazioni tipiche.

### 15.1.1. RUMORE PRODOTTO IN AMBIENTE ESTERNO

All'esterno il livello nel punto  $P$  distante  $r$  dalla sorgente avente potenza  $W$  è data dalla relazione (che si ripete per comodità):

$$L_p = L_w + 10 \log \frac{Q}{4\pi r^2} = L_w - 20 \log Q - 20 \log r - 11 \quad [136]$$

ove  $Q$  è l'indice di direzionalità già descritto. La relazione si applica per ciascuna banda di ottava (o terzi di ottava) fornendo così lo spettro del rumore prodotto alla distanza  $r$ .

Il livello così determinato andrà confrontato con i livelli limite indicati dalle norme per gli ambienti esterni. Ad esempio, se un gruppo frigorifero ha il seguente spettro di potenza:

Frequenza	Livello Potenza
Hz	dB
63	74
125	80
250	86
500	92
1000	89
2000	85
4000	79

L'applicazione della [136] porta ai seguenti risultati, assumendo un fattore di direzionalità pari a 2 per effetto della parete posteriore al refrigeratore:

Banda di Ottava	$L_w$	$10 \log Q$	$10 \log(4\pi r^2)$	$L_p$
Hz	dB	dB	dB	dB
63	74	3	32.6	44.4
125	80	3	32.6	50.4
250	86	3	32.6	56.4
500	86	3	32.6	62.4
1000	89	3	32.6	59.4
2000	85	3	32.6	55.4
4000	79	3	32.6	49.4

Si osserva che l'applicazione della [136] richiede la conoscenza dello spettro di potenza sonora emessa dalla sorgente.

Tuttavia proprio questo dato è spesso difficile da reperire perché i costruttori di apparecchi per impianti termotecnici sono poco propensi a fornirli.

I dati più frequentemente disponibili sono relativi ai livelli di pressione sonora ad 1 m di distanza dalla sorgente sonora, come esemplificato in Figura 337 e in Figura 338.

Mod. NRA - C (R407C)			275	300	325
Potenza frigorifera (C1+C2) <i>Cooling capacity (C1+C2)</i>	kW	C	-	-	-
		LC	56 (28+28)	66 (28+38)	75 (37,5+37,5)
Potenza assorbita totale <i>Total input power</i>	kW	C	-	-	-
		LC	18,80	22,00	24,90
E.E.R.	W/W	C	-	-	-
		LC	2,98	3	3,01
Potenza ventilatori <i>Fan motor power</i>	n°xW	C	-	-	-
		LC	4 x 145	6 x 145	6 x 145
Corrente assorbita ventilatori <i>Fan motor current absorption</i>	A	C	-	-	-
		LC	3,20	4,80	4,80
Portata aria <i>Air flow rate</i>	m³/h	C	-	-	-
		LC	13.720	20.450	20.450
Velocità motori ventilatori <i>Fan motor speed</i>	g/m r.p.m.	C	-	-	-
		LC	870	870	870
Pressione sonora <i>Sound pressure</i>	dB(A)	C	-	-	-
		LC	48	48	49
Corrente assorbita <i>Current absorption</i>	A	C	-	-	-
		LC	39	42,75	46,5
Corrente max. • <i>Max. current</i>	A		65	68	71
Corrente di spunto* • <i>Peak current*</i>	A		155	161	166
Carica gas refrigerante <i>Refrigerant gas charge</i>	kg	C - LC	2 x 8,50	2 x 8,75	2 x 8,75

Figura 337: Esempio di dati acustici disponibili per modelli di refrigeratori d'acqua

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	dB(A)	NR
Min (1040 m³/h @ 10 Pa)	49,6	44,2	42,0	38,3	34,9	30,8	23,0	40,8	<<40
Max (1580 m³/h @ 10 Pa)	49,8	45,7	43,7	43,9	42,1	38,0	33,3	46,5	42,0
Min (1400 m³/h @ 10 Pa)	52,6	48,5	43,2	41,7	41,0	32,5	26,7	44,4	41,0
Max (1940 m³/h @ 10 Pa)	54,7	52,6	46,9	45,1	44,0	38,9	34,1	47,7	44,0
Min (1940 m³/h @ 10 Pa)	54,7	53,5	44,2	46,6	42,8	38,9	33,7	48,1	43,5
Max (3020 m³/h @ 10 Pa)	56,6	54,7	47,0	48,2	44,3	40,8	37,0	49,8	45,0
Min (3020 m³/h @ 10 Pa)	58,2	56,6	44,6	44,8	42,6	38,7	33,7	47,9	42,5
Max (4970 m³/h @ 10 Pa)	58,9	57,0	48,9	49,0	46,2	41,1	38,3	51,1	46,5
Min (1040 m³/h @ 10 Pa)	49,2	44,1	41,6	36,8	32,8	30,3	--	39,8	<<40
Max (1580 m³/h @ 10 Pa)	49,7	45,8	43,1	43,2	40,1	36,2	30,9	44,8	40,0
Min (1400 m³/h @ 10 Pa)	51,1	46,8	41,0	38,3	34,0	28,3	23,8	39,8	<<40
Max (1940 m³/h @ 10 Pa)	53,1	51,6	45,2	43,1	40,3	37,4	32,0	45,8	40,5
Min (1150 m³/h @ 10 Pa)	50,5	46,6	41,4	38,6	33,4	29,0	23,0	39,8	<<40
Max (2050 m³/h @ 10 Pa)	53,7	52,1	45,4	44,2	40,8	36,0	34,1	46,1	41,0
Min (1940 m³/h @ 10 Pa)	52,1	49,9	43,0	43,6	40,6	34,5	28,6	45,1	41,0
Max (3020 m³/h @ 10 Pa)	54,8	51,9	46,0	46,0	41,6	38,2	33,4	47,1	42,5
Min (3020 m³/h @ 10 Pa)	53,4	51,4	43,8	44,4	40,7	36,2	32,6	45,8	41,0
Max (4970 m³/h @ 10 Pa)	56,0	54,1	48,6	48,9	45,5	41,0	38,0	51,0	46,0

Figura 338: Esempio di dati di LPS per una CTA

In Figura 339 si ha la rappresentazione della mappa acustica di emissione relativa ad un refrigeratore d'acqua: dall'esame dei livelli di potenza (in questo caso dato anche dai colori dei livelli) è possibile subito individuare le parti che più emettono potenza (in questo caso i compressori frigoriferi).

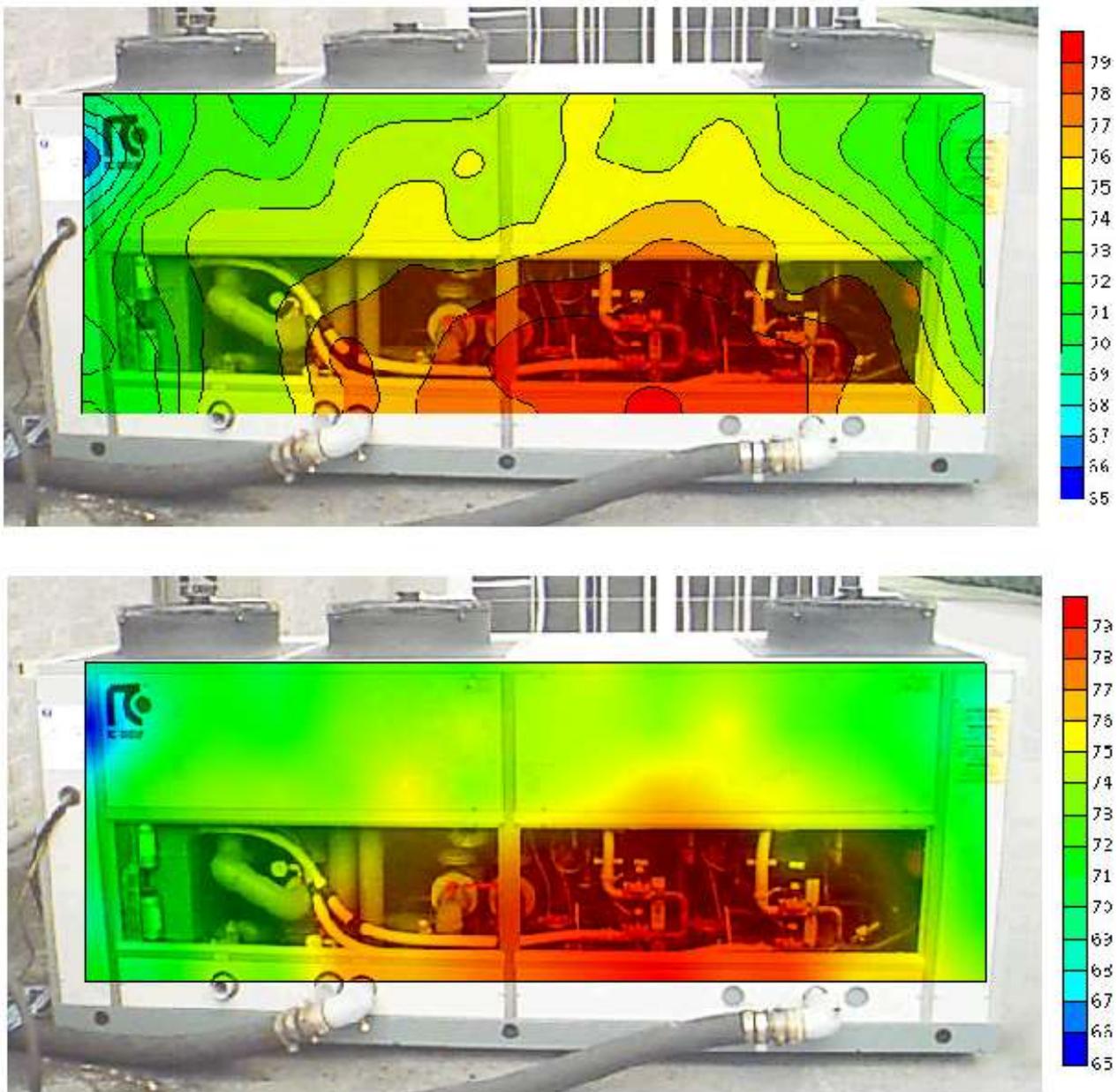


Figura 339: Mappa acustica per un refrigeratore d'acqua

Tuttavia questi dati non sono sufficienti per avere i livelli sonori reali in un punto  $P$  avente distanza  $r$  dalla sorgente. Infatti la [136] ci dice che, oltre allo spettro di potenza, occorre conoscere il fattore di razionalità  $Q$ . Ebbene la conoscenza del LPS a 1 m di distanza non consente di conoscere il LPS ad una distanza  $r$  dalla sorgente se non nel particolarissimo di  $Q=1$  in campo aperto e sorgente puntiforme isotropa. Si ricordi, infatti, che la potenza sonora è indipendente dall'ambiente di trasmissione del suono ma essendo caratteristica solo della sorgente acustica.

Il LPS, per contro, tiene conto della trasmissione sonora e quindi di tutte le interazioni che le onde acustiche hanno con l'ambiente nel quale si trasmettono. Nel caso di trasmissione in ambiente chiuso, ad esempio, vale quanto detto nel prosieguo (vedi §15.1.3) e pertanto occorre conoscere, oltre  $Q$  e lo spettro di potenza, anche la risposta acustica della sala (parametro  $R$ ). In definitiva non basta conoscere il LPS ad 1 m per avere il LPS in qualunque punto attorno alla sorgente. In Figura 340 si hanno le misure di LPS attorno ad un refrigeratore d'acqua ed è possibile osservare come i valori del livello di pressione vari fortemente a seconda del punto di misura (vedi anche Figura 339).

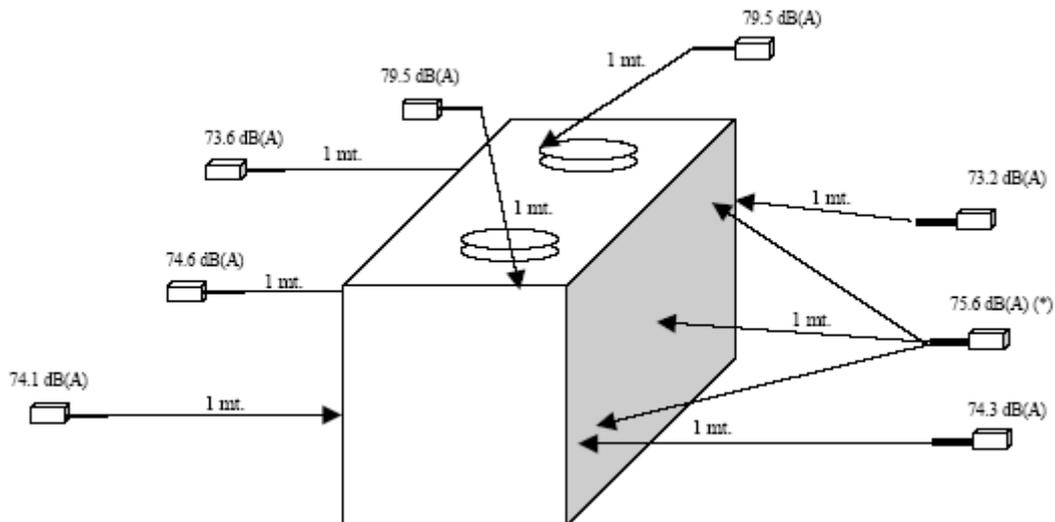


Figura 340: Distribuzione del LPS attorno ad un refrigeratore d'acqua

Purtroppo la misura della potenza sonora e di  $L_w$  non è facile e richiede una procedura complessa e costosa. Si giustifica così la mancanza di dati acustici effettivamente utili come  $L_w$ .

Il calcolo della potenza acustica viene effettuato applicando la procedura di calcolo della **ISO 3744** che prevede la misura della pressione acustica nei punti intorno alla macchina e la misura del tempo di riverberazione dell'ambiente in cui essa si trova. Combinando opportunamente i dati (vedi nel prosieguo) si calcola la potenza sonora della macchina.

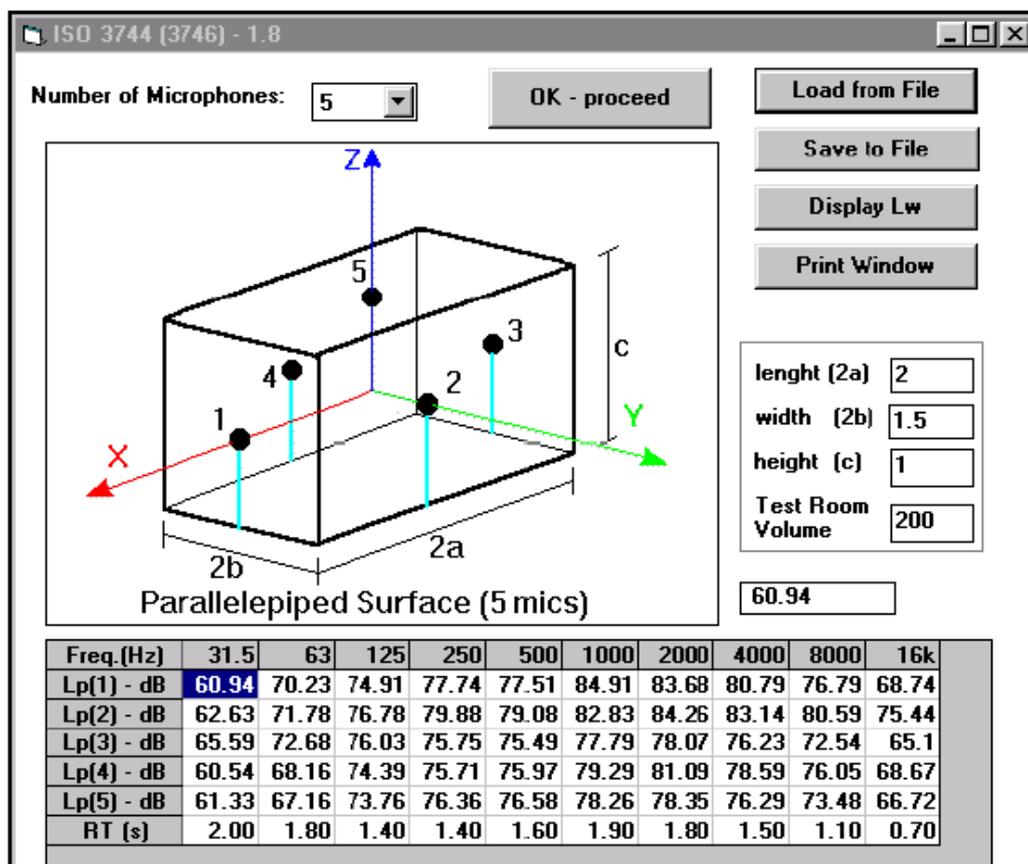


Figura 341: Schema dei punti di rilievo per il calcolo dei livelli di potenza sonora

E' anche possibile dare una rappresentazione spaziale della irradiazione di potenza acustica di una macchina. In figura si hanno alcune rappresentazioni per un caso concreto.

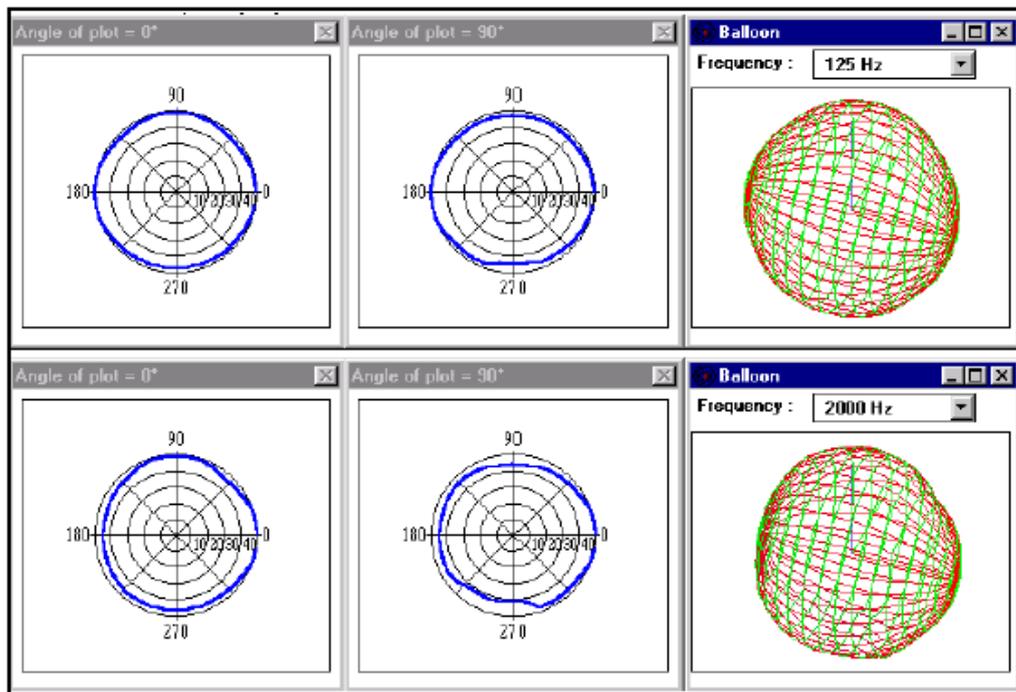


Figura 342: Rappresentazione spaziale della irradiazione di potenza acustica

### 15.1.2. VALUTAZIONE DEL RUMORE MEDIANTE LE CURVE NR ED NC

Noto lo spettro di potenza è possibile calcolare anche l'indice di valutazione del rumore secondo le curve NR o le NC. In questo modo è possibile anche conoscere, fissata la curva NR o NC limite (ad esempio la NR=40 dB o NC=40 dB), la perdita di inserzione dinamica del dispositivo da installare sulla macchina (silenziatore, attenuatore, ...).

Per l'esempio del refrigeratore d'acqua visto poc'anzi si rileva, dalla curva NR=40 dB, assunta come curva limite, la seguente distribuzione massima per bande di ottava:

Banda di ottava	Livello sonoro
Hz	dB
63	67
125	57
250	49
500	49
1000	40
2000	37
4000	35

Pertanto l'attenuazione richiesta, facendo la differenza (se positiva) fra i valori generati dal refrigeratore e quelli della curva NR40 si ha l'attenuazione richiesta, assumendo un coefficiente di sicurezza di 3 dB:

Banda di ottava	$L_p\text{-NR}_{40+3}$
Hz	dB

63	-
125	-
250	10.4
500	21.4
1000	23.4
2000	21.4
4000	17.4

Oltre alle curve NR si possono utilizzare le NC i cui livelli sono riportati nella seguente tabella:

VALORI NC (NOISE CRITERIA)							
Hz	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8.000
NC70	79	75	72	71	70	69	68
NC65	75	71	68	66	64	63	62
NC60	71	67	63	61	59	58	57
NC55	67	62	58	56	54	53	52
NC50	64	58	54	51	49	48	47
NC45	60	54	49	46	44	43	42
NC40	57	50	45	41	39	38	37
NC35	52	45	40	36	34	33	32
NC30	48	41	35	31	29	28	27
NC25	44	37	31	27	24	22	21
NC20	40	33	26	22	19	17	16
NC15	36	29	22	17	14	12	11

Tabella 51: Valori dei livelli NC

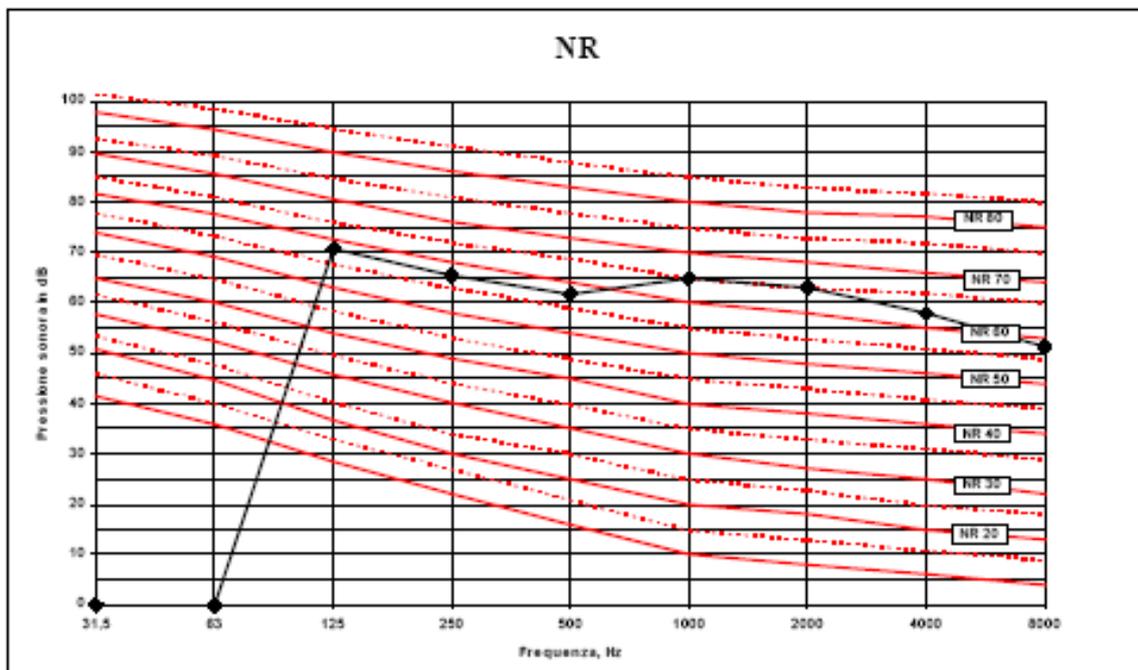


Figura 343: Esempio di tracciamento dello spettro di un rumore sulle curve NR

### 15.1.3. VALUTAZIONE DEL RUMORE ALL'INTERNO DI AMBIENTI CHIUSI

All'interno di ambienti chiusi, come già detto nel paragrafo precedente, oltre all'onda diretta si aggiunge anche l'effetto del riverbero della sala e pertanto la relazione diviene:

$$L_{p,d} = L_w + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi d^2} \right) + 10 \log \left( \frac{4}{R} \right) \quad [137]$$

con  $R$  attenuazione acustica della sala:

$$R = \frac{\sum S_i a_i}{1 - a_m} \quad e \quad a_m = \frac{\sum a_i S_i}{\sum S_i} \quad [138]$$

Spesso la [137] è diagrammata come indicato in Figura 344. Come si può osservare dalla [137] per conoscere il livello di pressione sonora in un punto P in ambiente chiuso occorre conoscere il tempo di riverberazione dell'ambiente ed il fattore  $R$ , oltre al solito fattore di direzionalità  $Q$ .

Le precedenti relazioni possono essere semplificate per ambienti regolari, arredati normalmente (abitazioni civili) e con una sola sorgente attiva, nella relazione:

$$L_p = L_w - 5 \log V - 3 \log f - 10 \log d + 12 \quad [139]$$

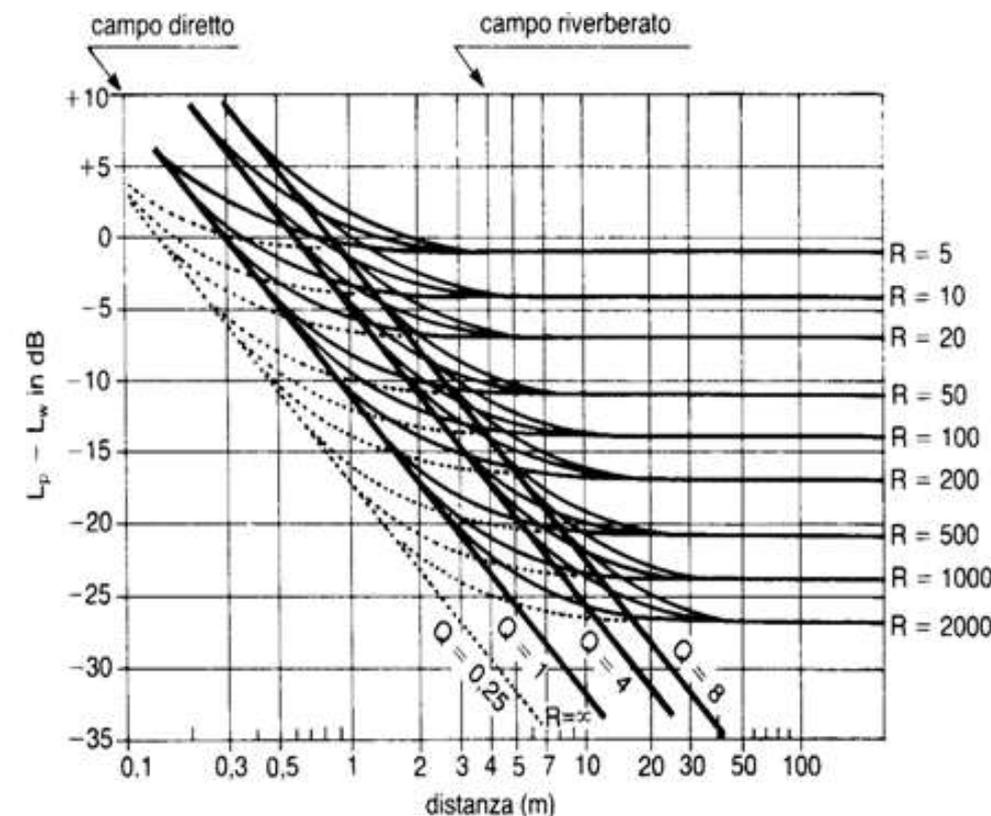


Figura 344: LPS in un punto P interno ad un ambiente chiuso

Applichiamo la precedente relazione al caso di una bocchetta di immissione dell'aria che abbia uno spettro di emissione dato dalla tabella seguente:

Banda di ottava	Livello sonoro
Hz	dB
63	74.1
125	66
250	56.9
500	57.4
1000	41.1

2000	45.7
4000	45.2

Effettuando i calcoli si ottiene il seguente spettro ad una distanza di 3 m:

Banda di ottava	$L_p$ ( a 3 m)
Hz	dB
63	65
125	56
250	46
500	45.6
1000	28.4
2000	32.1
4000	30.7

Nel caso siano presenti più sorgenti sonore occorre sommare i contributi energetici delle singole sorgenti e poi applicare la [139].

#### 15.1.4. CALCOLO DEL LIVELLO SONORO EMESSE DA UN VENTILATORE

I livelli di potenza sonora,  $L_w$ , sono di solito forniti dal costruttore per bande di ottava per le frequenze comprese fra 64 e 4000 Hz. In mancanza di dati si può utilizzare, in modo approssimato seppure utile, la relazione:

$$L_w = k_w + 10 \log \frac{m}{m_0} + 20 \log \frac{\Delta p}{\Delta p_0} + k_\eta + k_p \quad [140]$$

ove:

- $L_w$  è il livello sonoro del ventilatore, dB;
- $k_w$  è il livello specifico di potenza (espresso in dB) valutato per una portata  $m_0$  di riferimento pari ad  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  ed una pressione statica di riferimento  $\Delta p_0$  di 1 kPa;
- $m$  portata d'aria effettiva,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;
- $\Delta p$  pressione statica del ventilatore, kPa;
- $k_\eta$  coefficiente di correzione funzione dell'efficienza del ventilatore, dB;
- $k_p$  coefficiente di correzione per la sola banda di passaggio della pala, dB.

I valori dei coefficienti  $k_\eta$ ,  $k_p$ ,  $k_w$  sono dati nelle seguenti tabelle.

Ventilatore	Diametro girante	Bande di ottava (Hz), $k_w$							$k_p$
		63	125	250	500	1000	2000	4000	
									dB
Centrifugo pale in avanti	Tutti	95	91	87	84	82	80	76	2
Centrifugo pale indietro o profilo alare	>0.9 m	80	80	79	77	76	71	63	3
	<0.9 m	84	86	84	82	81	76	68	3
Assiale con alette raddrizzatrici	>1 m	87	84	86	87	85	82	80	6
	< 1 m	85	87	91	91	91	89	76	6
Radiale incubato senza alette	> 1 m	89	87	91	89	87	85	82	7
	< 1 m	88	89	95	94	92	91	85	7
Elicoidale	Tutti	96	99	106	104	103	100	94	5

Tabella 52: Livelli di sonora specifici per vari tipi di ventilatori

Rendimento	$k_\eta$
50÷55	15
55÷65	12
65÷75	9
75÷85	6
85÷95	3
95÷100	0

Tabella 53: Coefficienti di correzione per il rendimento dei ventilatori

Applichiamo il metodo ad un ventilatore centrifugo con pale in avanti funzionante, nel suo punto di lavoro, con rendimento  $\eta=0.80$ , portata  $m = 24 \text{ m}^3/\text{s}$  e con una prevalenza  $\Delta p = 0.25 \text{ kPa}$ . Applicando la [140] si ottengono i seguenti livelli:

Bande di ottava (Hz)	$L_w$ (dB)
63	93
125	89
250	85
500	87
1000	80
2000	78
4000	74

Tabella 54: Livelli di rumorosità del ventilatore

Per il rumore prodotto dal ventilatore dal lato premente (così come per il lato aspirante) una correzione di 3 dB:

$$L'_w = L_w - 3 \text{ dB}$$

### 15.1.5. ATTENUAZIONE SONORA IN CANALI METALLICI COIBENTATI

Per il calcolo dell'attenuazione sonora in canali metallici coibentati si utilizza l'abaco di Figura 345. Il parametro  $Y$  è la lunghezza del canale, in metri,  $P/S$ , ( $1/m$ ), è il rapporto fra il perimetro del canale e l'area della sezione. L'attenuazione sonora per canali non coibentati o nei pezzi speciali (curve, gomiti, raccordi, ...) sono riportati nei manuali specializzati.

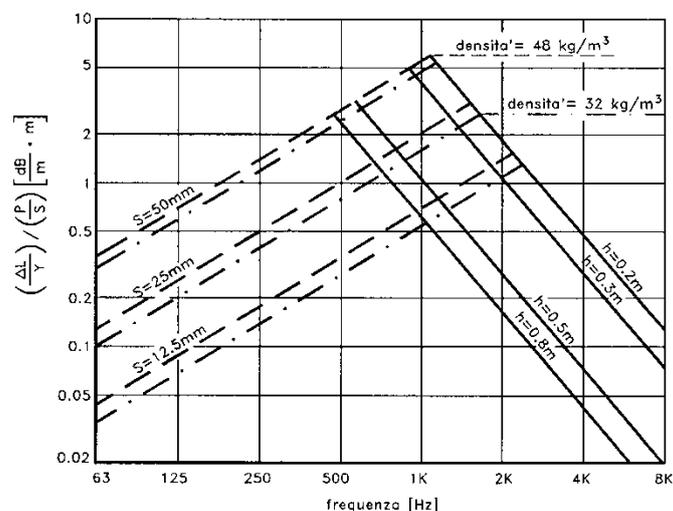


Figura 345: Attenuazione acustica in canali rettangolari coibentati

## Canali dritti

Nella propagazione attraverso la rete di distribuzione dell'aria il rumore si attenua in modo naturale per effetto della dissipazione energetica dovuta alla vibrazione delle pareti dei condotti non perfettamente rigide.

L'azione della pressione sonora fluttuante nei canali mette in vibrazione le pareti trasformando l'energia acustica in energia meccanica che viene in parte irradiata all'esterno del condotto come rumore ed in parte assorbita dallo smorzamento interno. In Figura 345 è possibile osservare il bilancio energetico di una parete di condotto con riferimento all'energia sonora immessa nel canale dal ventilatore. Un'analisi accurata del problema richiede la suddivisione dello stesso in tre fasi:

- stima della potenza sonora totale immessa dal ventilatore nel sistema (dato in genere reperibile dal costruttore);
- calcolo dell'attenuazione totale dell'energia immessa per effetto delle varie parti che compongono l'impianto aeraulico (tratti rettilinei, curve, derivazioni ecc.);
- stima della quantità di energia irradiata dal terminale nell'ambiente ventilato (con riferimento alla bocchetta più prossima al ventilatore a fini cautelativi).

E' comunque chiaro che dovunque vada l'energia assistiamo ad una riduzione del livello di potenza sonora originario lungo il condotto di distribuzione dell'aria. Essendo, inoltre, il processo dissipativo continuo è preferibile esprimere l'entità della perdita energetica per metro di condotto attraversato pervenendo così alle tabelle di seguito riportate dove in relazione alla forma del condotto, alla presenza di tratti curvi, derivazioni e terminali sono illustrati i valori di attenuazione dell'energia sonora alle differenti frequenze.

E' importante sottolineare che alle basse frequenze i condotti a sezione rettangolare attenuano maggiormente di quelli a sezione circolare; ciò è legato al fatto che a tali frequenze l'attenuazione è inversamente proporzionale alla rigidità che è relativamente maggiore nel caso di condotti a sezione circolare.

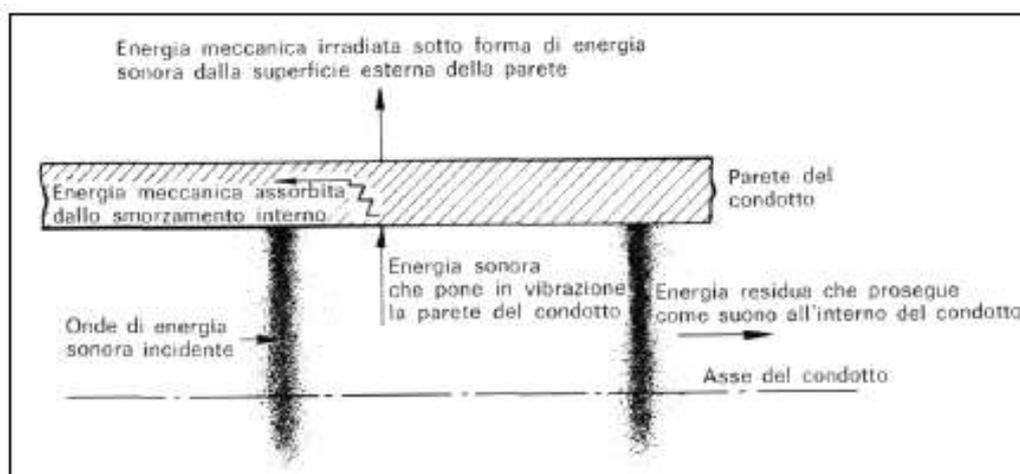


Figura 346: Schema di trasmissione del rumore in un canale

**Attenuazione (in dB/m) dei condotti rettilinei rigidi**

Sezione	Lato minore o diametro (mm)	Attenuazione (dB/m) secondo la banda d'ottava (Hz)							
		63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Circolare (senza rivestimento)	75 - 199	0.07	0.10	0.16	0.16	0.33	0.33	0.33	0.33
	200 - 399	0.07	0.10	0.10	0.16	0.23	0.23	0.23	0.23
	400 - 799	0.07	0.07	0.07	0.10	0.16	0.16	0.16	0.16
	800 - 1500	0.03	0.03	0.03	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
Rettangolare (senza rivestimento)	75 - 199	0.16	0.66	0.49	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
	200 - 399	0.48	0.66	0.49	0.33	0.23	0.23	0.23	0.23
	400 - 799	0.50	0.66	0.33	0.23	0.16	0.16	0.16	0.16
	800 - 1500	0.60	0.33	0.16	0.10	0.07	0.07	0.07	0.07
Circolare (con rivest. esterno)	75 - 199	0.14	0.20	0.35	0.16	0.33	0.33	0.33	0.33
	200 - 399	0.14	0.20	0.20	0.16	0.23	0.23	0.23	0.23
	400 - 799	0.14	0.14	0.14	0.10	0.16	0.16	0.16	0.16
	800 - 1500	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
Rettangolare (con rivest. esterno)	75 - 199	0.35	1.30	1.00	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
	200 - 399	1.00	1.30	1.00	0.33	0.23	0.23	0.23	0.23
	400 - 799	1.00	1.30	0.70	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
	800 - 1500	1.00	0.70	0.35	0.10	0.07	0.07	0.07	0.07
Circolare (con rivest. interno)	75	0.60	0.70	3.50	12.0	30.0	35.0	30.0	25.0
	125	0.60	0.70	2.50	7.00	18.0	24.0	18.0	12.0
	200	0.60	0.70	2.00	3.00	10.0	15.0	10.0	8.00
	400	0.60	0.40	0.40	2.50	6.00	10.0	6.00	5.00
Rettangolare (con rivest. interno)	75	0.60	0.70	3.50	12.0	30.0	35.0	30.0	25.0
	125	0.60	0.70	2.50	7.00	18.0	24.0	18.0	12.0
	200	0.60	0.70	2.00	3.00	10.0	15.0	10.0	8.00
	400	0.60	0.40	0.40	2.50	6.00	10.0	6.00	5.00
Circolare (con rivest. int. ed est.)	75	1.20	1.40	7.00	12.0	30.0	35.0	30.0	25.0
	125	1.20	1.40	5.00	7.00	18.0	24.0	18.0	12.0
	200	1.20	1.40	4.00	3.00	10.0	15.0	10.0	8.00
	400	1.20	0.80	0.80	2.50	6.00	10.0	6.00	5.00
Rettangolare (con rivest. int. ed est.)	75	1.20	1.40	7.00	12.0	30.0	35.0	30.0	25.0
	125	1.20	1.40	5.00	7.00	18.0	24.0	18.0	12.0
	200	1.20	1.40	4.00	3.00	10.0	15.0	10.0	8.00
	400	1.20	0.80	0.80	2.50	6.00	10.0	6.00	5.00

Nota - Il rivestimento s'intende di materiale fonoassorbente con massa specifica di 35 - 40 kg/m<sup>3</sup> e spessore di 50 mm.

Tabella 55: Attenuazione acustica in canali rettilinei rigidi

Alle alte frequenze i valori di attenuazione sono comparabili in quanto la trasmissione del rumore attraverso i divisori dipende invece dalla massa per unità di superficie del divisorio: a parità di materiale, la dispersione del rumore è la stessa. Per canali rigidi rettilinei si può utilizzare la Tabella 55 per calcolare l'attenuazione acustica.

### Gomiti

Nei gomiti, più che dallo smorzamento o assorbimento interno, l'attenuazione del rumore è prevalentemente legata alla riflessione in direzione della sorgente. In funzione di ciò è logico pensare che l'attenuazione maggiore la si ha con una curva a 90°. Vi sono poi dei picchi di attenuazione alle frequenze cui la lunghezza d'onda è il doppio della larghezza del condotto.

In generale è possibile affermare che l'attenuazione prodotta da una curva è direttamente proporzionale alla resistenza aerodinamica offerta.

Per i gomiti si può utilizzare la Tabella 56 per calcolare l'attenuazione acustica.

**Attenuazione (dB) dei raccordi a gomito rigidi**

Gomiti a sezione rettangolare	Lato minore della sezione (mm)	Attenuazione (dB) secondo la banda d'ottava (Hz)							
		63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Con alette deflettrici (senza rivestimento)	75 - 140	0	0	0	0	0	1	2	3
	150 - 275	0	0	0	0	1	2	3	3
	300 - 575	0	0	0	1	2	3	3	3
	600 - 950	0	0	1	2	3	3	3	3
	975 - 1100	0	1	2	3	3	3	3	3
	1105 - 1350	1	2	3	3	3	3	3	3
	1375 - 1500	1	2	3	3	3	3	3	3
Senza alette deflettrici (senza rivestimento)	75 - 100	0	0	0	0	1	7	7	3
	115 - 140	0	0	0	0	5	8	4	3
	150 - 200	0	0	0	1	7	7	4	3
	225 - 275	0	0	0	5	8	4	3	3
	300 - 400	0	0	1	8	6	3	3	3
	425 - 575	0	0	6	8	4	3	3	3
	600 - 825	0	3	8	5	3	3	3	3
	850 - 950	0	5	8	4	3	3	3	3
	975 - 1100	0	6	8	4	3	3	3	3
	1125 - 1350	0	8	6	3	3	3	3	3
	1375 - 1500	0	8	5	3	3	3	3	3
Senza alette deflettrici (con rivest. interno)	75 - 100	0	0	0	0	2	13	18	18
	115 - 140	0	0	0	1	7	16	18	16
	150 - 200	0	0	0	2	13	18	18	16
	225 - 275	0	0	1	7	16	18	16	17
	300 - 400	0	0	4	14	18	18	16	18
	425 - 575	0	1	8	17	18	16	17	18
	600 - 825	0	4	15	18	17	17	18	18
	850 - 950	0	5	16	18	17	17	18	18
	975 - 1100	1	8	17	18	16	17	18	18
	1125 - 1350	2	12	18	18	16	18	18	18
	1375 - 1500	3	14	18	18	17	18	18	18
Derivazione a T (rivestimento solo nella derivazione)	75 - 100	0	0	0	0	2	11	14	13
	115 - 140	0	0	0	1	8	14	14	13
	150 - 200	0	0	0	2	11	13	13	12
	225 - 275	0	0	1	6	14	13	13	11
	300 - 400	0	0	3	12	13	12	12	10
	425 - 575	0	2	9	14	12	10	11	10
	600 - 825	0	4	13	13	11	10	10	10
	850 - 950	0	5	14	13	11	10	10	10
	975 - 1100	0	7	14	13	11	10	10	10
	1125 - 1350	0	11	14	12	10	10	10	10
	1375 - 1500	0	12	14	11	10	10	10	10

Nota - Il rivestimento s'intende di materiale fonoassorbente con massa specifica di 35-40 kg/m<sup>3</sup> e spessore di 50 mm.

Tabella 56: Attenuazione acustica dei raccordi a gomito

## Diramazioni

In corrispondenza delle derivazioni l'attenuazione acustica è legata essenzialmente alla ripartizione della potenza sonora complessiva nei condotti secondari.

A tale proposito è possibile, senza commettere grossi errori, assumere che l'energia proveniente dal condotto principale si distribuisca nei condotti secondari nella stessa misura in cui lo fa la portata.

Per il calcolo dell'attenuazione si può utilizzare il diagramma di Figura 347.

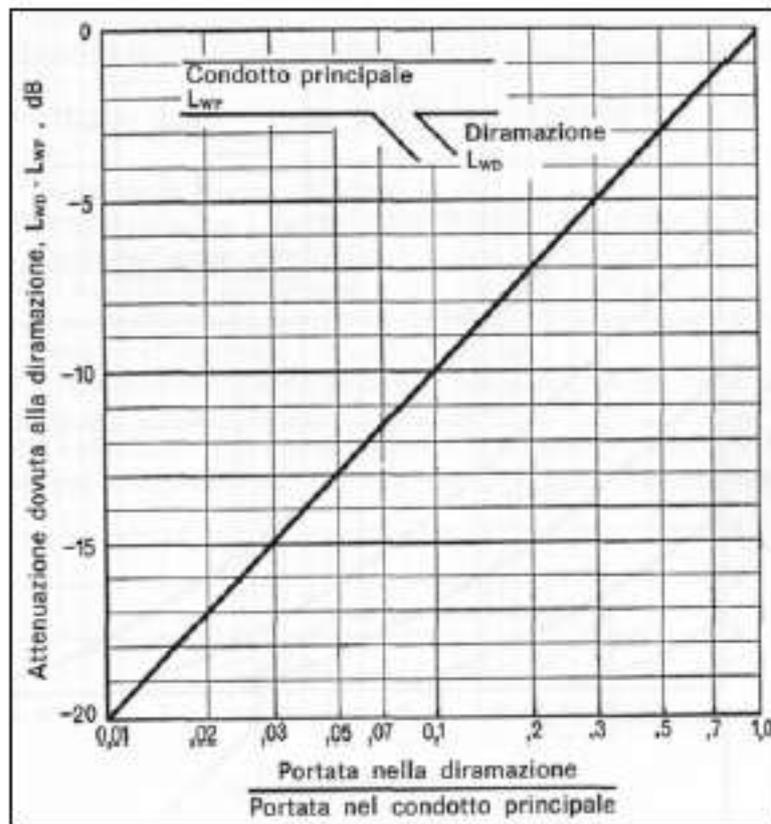


Figura 347; Attenuazione acustica nelle diramazioni

## Terminali di condotto

In Figura 348 sono riportati i valori di attenuazione dell'energia, per riflessione, alla bocca terminale di un condotto, con riferimento alla superficie "lorda" delle bocchette o dei diffusori trascurando feritoie e deflettori che in genere non danno un contributo sensibile in termini di riflessioni (salvo a frequenze molto elevate con lunghezze paragonabili alle loro dimensioni).

Per terminali differenti da quelli convenzionali (bocchette e diffusori) occorre richiedere ai costruttori i valori di perdita per inserzione in sostituzione di quelli riportati nel grafico di Figura 348.

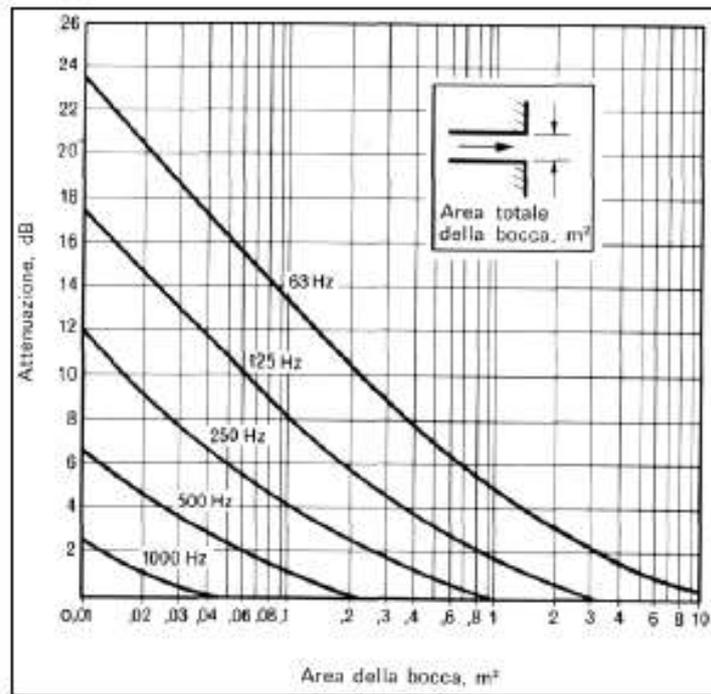


Figura 348: Attenuazione acustica nei terminali di condotto

**Plenum**

Come è possibile osservare dalla figura 11, un plenum consiste in una grande cavità rivestita di materiali fonoassorbenti dotata almeno di un ingresso ed una uscita.

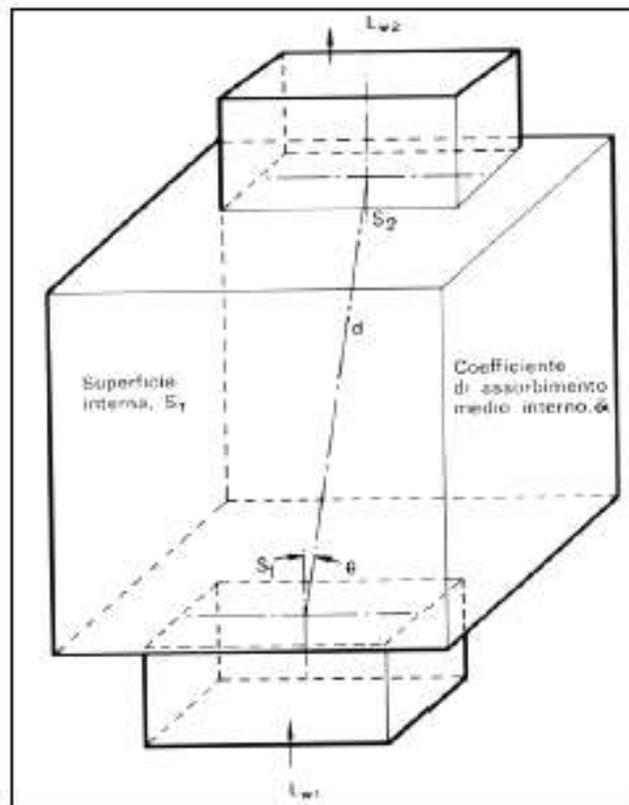


Figura 349: Geometria di un plenum

L'energia acustica che entra in tale cavità viene in parte assorbita dalle pareti, in parte riflessa ed in parte inviata verso l'uscita in misura proporzionale all'area della sezione di scarico ed inversamente proporzionale alla distanza fra i centri delle due bocche.

L'attenuazione prodotta dal plenum, posto in genere all'uscita del ventilatore, è valutabile attraverso la relazione:

$$\Delta L_w - 10 \text{Log}_{10} \left[ S_2 \left( \frac{\cos \theta}{2\pi d^2} + \frac{(1 - \bar{\alpha})}{\bar{\alpha} S_T} \right) \right]$$

dove:

- $S_2$  è l'area della sezione di uscita del plenum;
- $S_T$  è l'area della sezione totale interna del plenum, comprese le sezioni di ingresso e di uscita);
- $\bar{\alpha}$  è il coefficiente medio di assorbimento all'interno del plenum.

Si tratta ovviamente di relazioni teoriche che hanno i loro limiti visto che a rigore occorrerebbe computare l'ulteriore riduzione dovuta alle riflessioni alla sezione d'ingresso al plenum.

L'approssimazione introdotta dalla relazione è buona alle alte frequenze mentre alle basse frequenze, quando la lunghezza d'onda è più vicina o supera le dimensioni della camera, l'attenuazione calcolata sottostima di 5 - 10 dB il valore reale ottenibile.

E' ovvio che potendo esserci nell'impianto altri elementi (filtri, cassette di miscelazione, ecc ...) in grado di attenuare ulteriormente il livello di rumore trasmesso attraverso le condotte occorrerà rivolgersi ai vari costruttori per stimare i valori di attenuazione previsti alle specifiche condizioni operative.

### Corretta esecuzione della posa in opera dei canali

Per ridurre in modo significativo la rumorosità del flusso dell'aria nei canali è opportuno prevedere alcuni accorgimenti costruttivi tendenti ad eliminare, o quanto meno attenuare, i moti turbolenti dell'aria in occasione di attraversamenti di restringimenti, congiunzioni e/o derivazioni.

In genere è opportuno evitare cambiamenti bruschi di direzione a favore di raccordi a grande raggio di curvatura. Inoltre, là dove necessario (vedi Figura 350), è consigliabile inserire alette guida nei gomiti e/o nelle derivazioni in modo da far mantenere paralleli i filetti fluidi ed evitare la turbolenza.

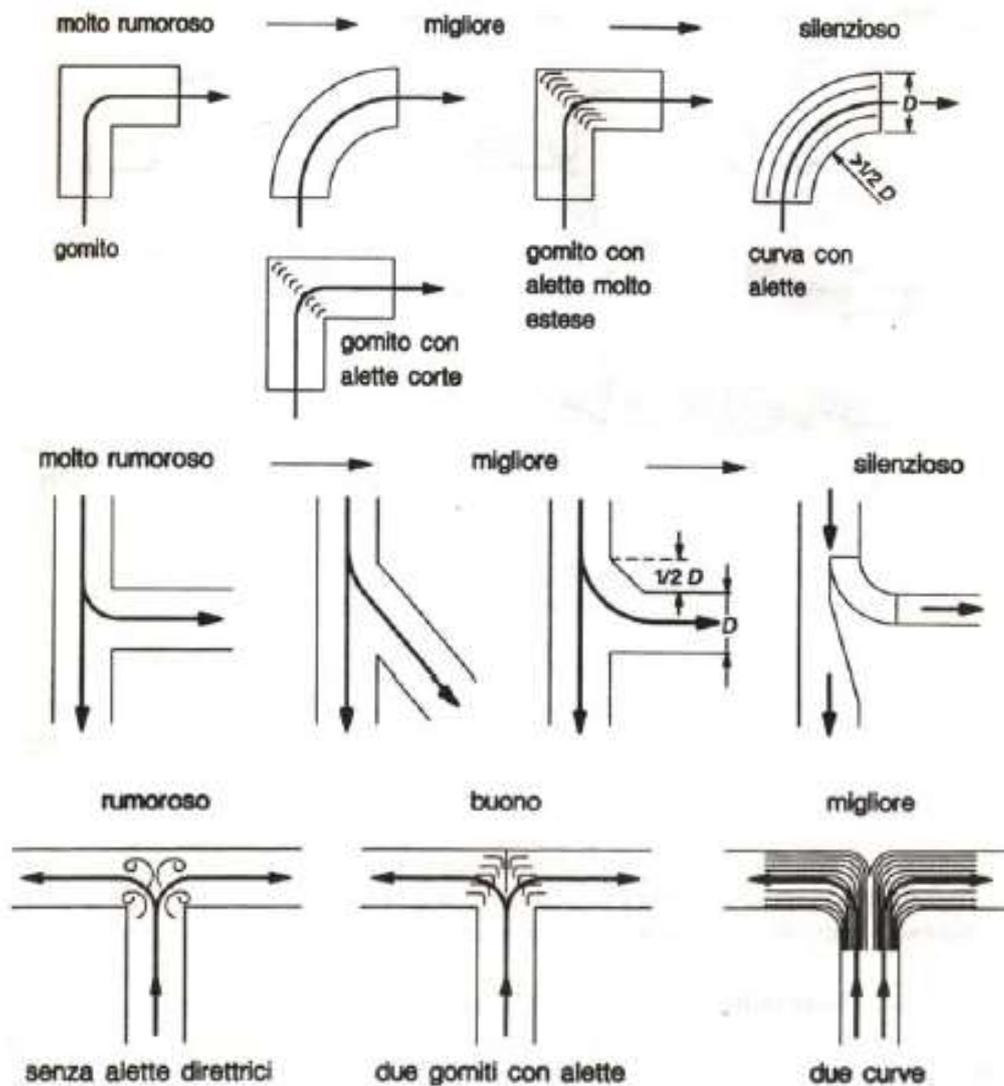


Figura 350: Riduzione della rumorosità nelle T e diramazioni

## 15.2. ATTENUAZIONE DEL RUMORE NEI CONDOTTI

Quando un fluido si sposta all'interno di condotti il rumore generato si trasmette sia attraverso le pareti di questo che attraverso lo stesso fluido. Pertanto per attenuare il rumore occorre utilizzare materiali assorbenti posti all'interno degli stessi condotti che possono avere comportamento:

- Attivo: nel senso che riflettono parzialmente verso le pareti dello stesso condotto l'energia sonora su di essi incidente;
- Dissipativo: trasformano in calore (dissipano) l'energia sonora incidente.

Con riferimento alla Figura 351 si può dire che l'energia entrante nella sezione AB è somma di quella assorbita nel tratto  $dx$  e di quella uscente dalla sezione CD e pertanto deve valere la relazione:

$$IA - I_{padx} = (I - dI)A \quad [141]$$

ove  $I$  è l'intensità acustica incidente,  $W/m^2$ , e  $dI$  è la perdita di intensità nel tratto  $dx$ ,  $P$  il perimetro,  $A$  l'area della sezione ed  $a$  il fattore di assorbimento del materiale di rivestimento del condotto. Dopo le opportune semplificazioni si ha:

$$AdI = -PdxIa$$

da cui si ricava:

$$\frac{dI}{I} = -\frac{Pdx a}{A}$$

che integrata per la lunghezza  $l$  del condotto fornisce:

$$\ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right) = -\frac{Pl a}{A}$$

Passando dai logaritmi naturali a quelli decimali la precedente relazione diviene:

$$\ln 10 \operatorname{Log} \frac{I_1}{I_2} = \ln \frac{I_1}{I_2} = \frac{Pl a}{A}$$

e per la definizione di potere fonoisolante si ha:

$$R = 10 \operatorname{Log} \frac{1}{t} = 10 \operatorname{Log} \frac{I_1}{I_2} = \frac{10}{2.3} \frac{Pl a}{A} = \frac{a}{0.23} \frac{Pl}{A}$$

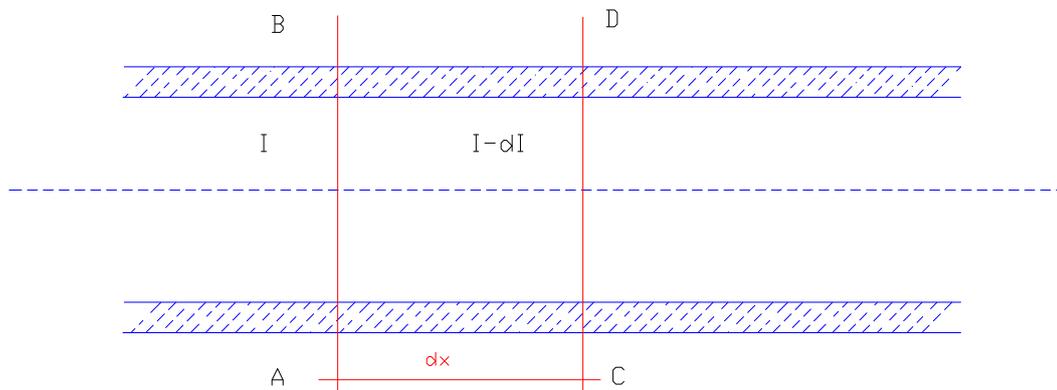


Figura 351: Attenuazione del suono nei condotti

Ponendo  $k = a/0.23$  si può scrivere la legge generale dell'attenuazione sonora:

$$R = k \frac{Pl}{A} \quad [142]$$

Se il fattore di assorbimento è misurato in camera riverberante (onde casuali) allora Knudsen suggerisce di porre:

$$k = \frac{a^{1.4}}{0.08} \quad [143]$$

che risulta leggermente maggiore di quello teorico  $a/0.23$  ma cresce più lentamente con  $a$ , come confermato sperimentalmente.

### Posizionamento dei silenziatori

I silenziatori debbono essere correttamente posizionati per evitare che il rumore si trasmetta nei locali attraversati dai canali, come illustrato in Figura 352, e cioè all'interno della centrale termica. Inoltre il silenziatore deve essere posto il più vicino possibile alla sorgente di rumore, cioè al ventilatore, per intercettare subito le onde acustiche che da questa si originano.

Inoltre è opportuno inserire un giunto antivibrante (un soffiutto in tela) in modo da interrompere la trasmissione delle vibrazioni lungo i canali di mandata. Il corretto inserimento di un silenziatore è illustrato nella seguente Figura 353.

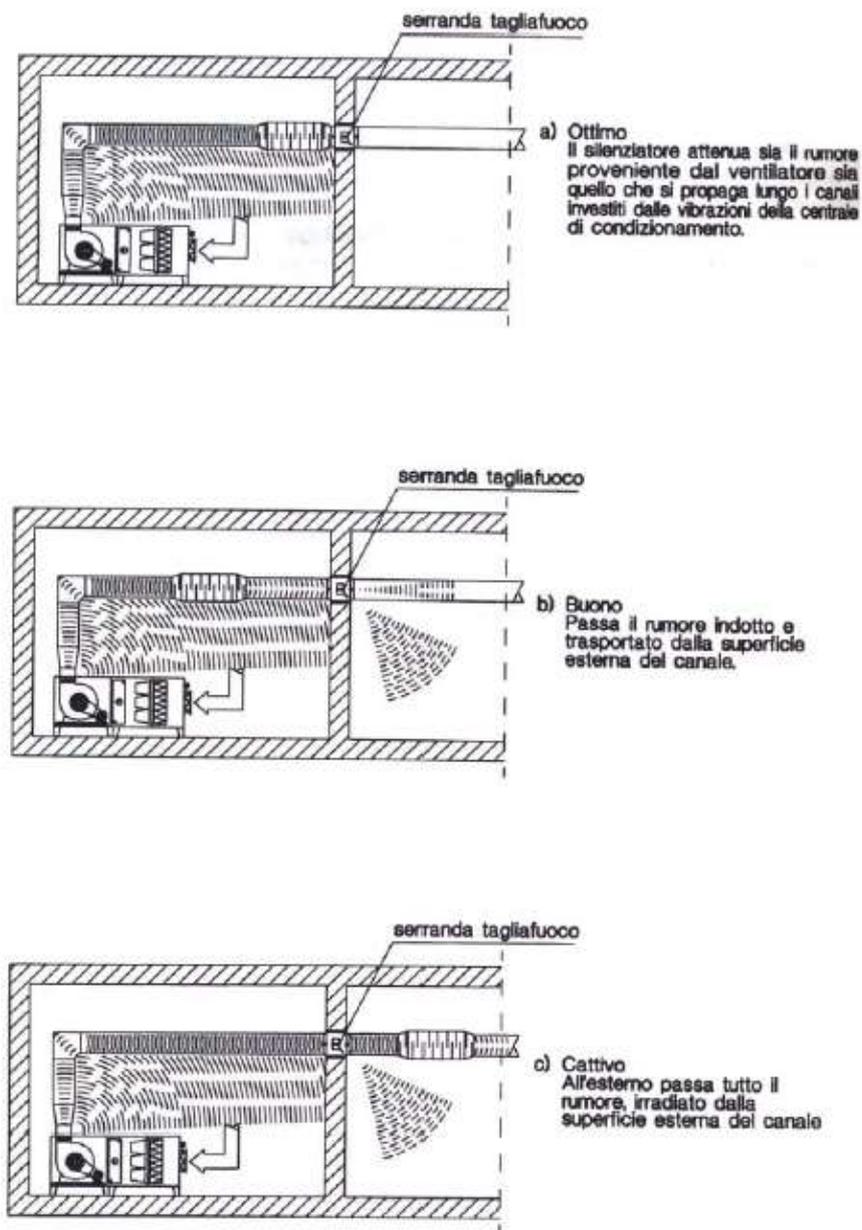
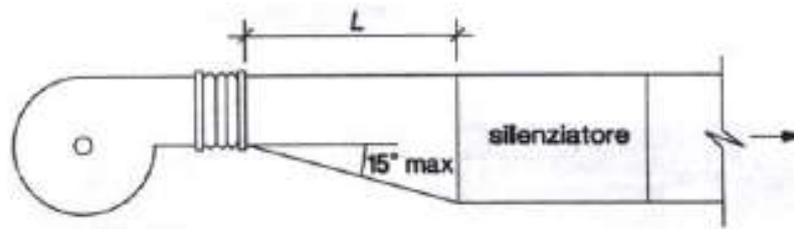
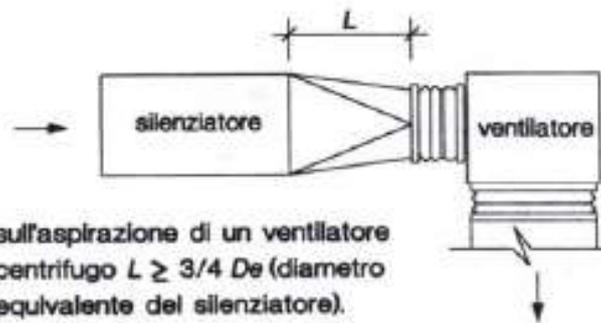


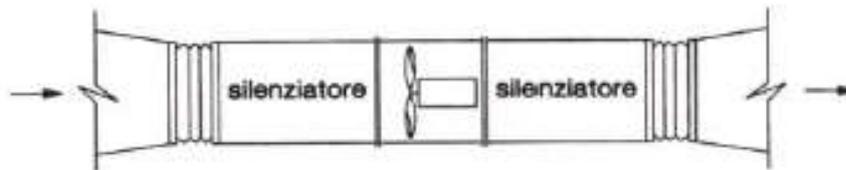
Figura 352: Corretto posizionamento dei silenziatori



sul premente del ventilatore centrifugo  
 $L = w/5$  volte il diametro della girante,  
 dove  $w$  è la velocità di uscita in m/s.



sull'aspirazione di un ventilatore  
 centrifugo  $L \geq 3/4 D_e$  (diametro  
 equivalente del silenziatore).



silenziatori circolari direttamente accoppiati  
 a ventilatore assiale

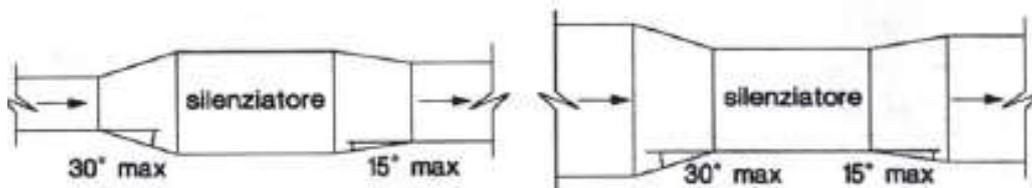


Figura 353: Punto di inserimento del silenziatore

## 16. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

### Testi Fondamentali di riferimento

1. G. CAMMARATA: "Acustica delle Sale", Dispense AA 1996, Catania
2. G. CAMMARATA: "Impianti Tecnici Edili", Vol. 2°, Dispense AA 2006-2007, Facoltà di Architettura di Siracusa
3. E. CIRILLO; "Acustica Applicata", Ed. Mc. Graw Hill, 1997
4. G. MONCADA LO GIUDICE- S. SANTOBONI: "Acustica", Masson 1995
5. G. MONCADA LO GIUDICE- L. DE SANTOLI: "Comfort Termico, Acustico e Illuminotecnico", Ed. ESA, Roma 1999
6. A. GIULIANI – A. COCCHI : "Elementi di Acustica Tecnica", E. Petroni, Bologna
7. D. FACONTI – S. PIARDI: "La qualità ambientale degli edifici", Maggioli Editore, 1998
8. A. SACCHI, G. CAGLIERIS: "Fisica Tecnica - Vol. 2 Climatizzazione", UTET, 1996
9. Y. ANDO - Concert Hall Acoustics - Springer-Verlag, 1985
10. G. VON BÉKÉSY: Sensory Inhibition - Princeton University Press, 1967
11. M. BARRON - Auditorium Acoustics and Architectural Design - E & FN SPON, 1993
12. L. BENAREK - Music, Acoustics and Architecture - J.W. & S, 1962
13. L. BENAREK - Acoustics - McGraw Hill, 1954 e 1983
14. J. BLAUERT - Spatial Hearing - The MIT Press, 1983
15. L. CREMER - Auditorium Acoustics - Applied Science Pub., 1975
16. L. CREMER, H.A. MULLER - Principles and Applications of Room Acoustics - Applied Science Pub. London, 1982
17. D.G. CRIGHTON, A.P. DOWLING, J.E. FLOWERS WILLIAMS, M. HECKL, F.G. LEPPINGTON: Modern Methods in Analytical Acoustics, Lecture Notes, Springer Verlag, 1992
18. B.F. DAY, R.D. FORD, P. LORD - Building Acoustics - Elsevier Pub. London, 1969
19. A. FARINA - La caratteristica acustica delle sale da spettacolo con particolare attenzione alle esigenze di ascolto della musica sinfonica - Tesi di Dottorato in Fisica Tecnica, A.A. 1985-86, Bologna
20. M. FORSYTH - Edifici per la Musica - Zanichelli, 1991

21. M. FORSYTH - Auditoria - Designing for the performing arts - Mitchell, London, 1987
22. S. GRAZIANI - Metodologie avanzate per l'elaborazione di segnali numerici - Tesi di Dottorato in Ingegneria Elettrotecnica, AA. 1993-94, Catania
23. S. HANDEL - Listening, an introduction to the perception of auditory events - Cambridge Mass. MIT Press, 1989
24. K.W. HIPEL - Fuzzy set methodologies in multicriteria modeling, in Fuzzy information and decision processes - a cura di M.M. Gupta e E. Sanchez, North Holland Company, 1982.
25. IEC Standard #268-16
26. G.C. IZENOUR - Theatres Design - Mc. Graw Hill, 1977
27. V. L. JORDAN - Acoustical Design of Concert Hall and Theatres - Applied Science Publishers, 1980
28. V. L. JORDAN - Auditorium Acoustics - Applied Science Publishers, 1975
29. J.P. JULLIEN - Acoustique des salles - 1982
30. A. KANDEL - Fuzzy mathematical techniques with applications - Addison- Wesley Publishing Company, 1986.
31. H. KUTTRUFF - Room Acoustics - Elsevier Applied Science, 1991
32. P. LORD, D. TEMPLETON - The Architecture of sound - Designing places of assembly - Architectural Press, London, 1986
33. L. MAFFEI: Descrizione del suono in ambienti chiusi mediante la tecnica del tracciamento dei raggi sonori. Una procedura originale e verifiche sperimentali. Tesi di Dottorato in Fisica Tecnica, Aprile 1987.
34. L. MAKRINENKO - Acoustics of auditorium in public buildings - Acoustics Society of America and American Institute of Physics, 1994
35. J. MEYER - Acoustics and the performance of music - Verlag das Musikinstrument, Frankfurt am Main, 1978
36. L. ORREY - A concise history of Opera - Thames and Hudson, London, 1972
37. H.N. PARMAN - Modern Factor Analysis - University of Chicago Press, 1968
38. W.C. SABINE - Collected papers on Acoustics - Dover Pub., 1964, Ristampa
39. E.O. SACHS - Modern Opera Houses and Theatres - Batsford London, 1896
40. G. SAUNDERS - A treatise on Theaters - London, 1790, Ristampa in facsimile da parte della Benjamin Blom, N.Y., 1968
41. R. SOUTHERN - The medieval theatre in the round - Rev. Faber & Faber, London, 1975
42. M.R. SCHROEDER - Number and Theory in Science and Communication - Springer-Verlag, 1990 - Muzzio Editor, 1987
43. J.V. TOBIAS - Foundations of modern auditory theory - Academic Press, N.Y., 1972
44. M. TOHYAMA, H. SUZUKI, Y. ANDO - The nature and technology of acoustic space - Academic Press, 1995
45. H. WILKENS, G. PLENGE - The correlation between subjective and objective data of concert halls - In Auditorium Acoustics, Applied science Pub., London, 1975
46. J. VERMEIL - Opéras d'Europe - Ed. Plume, Paris, 1989

### Publicazioni

1. G. CAMMARATA, et alii - Procedura automatizzata per l'ottimizzazione della copertura in un auditorio: prima fase - Congresso Nazionale AIA, Torino, 1983

2. G. CAMMARATA, et alii - Procedura automatizzata per l'ottimizzazione della copertura in un auditorio: seconda fase - Congresso Nazionale AIA, Perugia, 1984
3. G. CAMMARATA et alii - Disegno del profilo della copertura in un auditorio tramite una procedura automatizzata - Rivista Italiana di Acustica, Vol. VIII, 3-1984
4. G. CAMMARATA, et alii - Automatic design of ceiling profile for an auditorium - 5° FASE, Salonico, 1985
5. G. CAMMARATA et alii - Indici di qualità acustica del Teatro Bellini di Catania - Congresso Nazionale AIA, Padova, 1993
6. G. CAMMARATA et alii - Applicazione della fuzzy logic alla valutazione soggettiva di una sala musicale - Nota Interna, Facoltà di Ingegneria di Catania, 2-1994
7. G. CAMMARATA et alii - Fuzzy Logic and subjective preferences to assess acoustics quality - CIARM 95, Ferrara Maggio 1995.
8. G. CAMMARATA et alii - A virtual instruments for the analysis of objective acoustic parameters - CIARM 95, Ferrara Maggio 1995.
9. G. CAMMARATA et alii - Analisi acustica di alcune sale teatrali mediante strumenti virtuali - Congresso AIA 95, Bologna settembre 1995.
10. G. CAMMARATA et alii: Analisi dei parametri acustici oggettivi in alcuni teatri italiani: Influenza del fattore di riflessione diffusa. Congresso AIA 99, Genova Maggio 1999.
11. G. CAMMARATA, Analisi del rumore urbano nelle città di Catania e Messina, Ricerca in corso di completamento per il POP 90/93, Mod. B.16.1.2.a, Anno 1997.
12. G. CAMMARATA et alii, Modelli per il rumore urbano per Catania e Messina, Ricerca in corso di completamento per il POP 90/93, Mod. B.16.2.1, Anno 1997.
13. G. CAMMARATA et alii: "Neural Network Versus Fuzzy Logic" - Techniques for Modeling Urban Noise Pollution", 1996
14. G. CAMMARATA, "Nuove metodologie per la modellistica del rumore urbano". Lipari 1997
15. G. CAMMARATA, "Inquinamento da traffico veicolare nelle città di Catania e Messina - Nuove metodologie per la modellistica del rumore urbano". Catania 1998.
16. G. CAMMARATA et alii, "A Model for Urban Traffic Evaluation" , INTER-NOISE95, Newport, CA, USA, 10-12 Luglio, 1995.
17. G. CAMMARATA et alii, "Neural Network for the Analysis of the Air Pollution in Urban Areas" EUFIT95, Aachen, Germany, 28-31 Agosto, 1995.
18. G. CAMMARATA et alii, "New Predictive Models for Traffic Noise in Urban Area», XXIII AIA, Bologna, 12-14 September, 1995.
19. G. CAMMARATA et alii, "Fuzzy Logic For Noise Pollution Evaluation», J. Acoust. Soc. Am. vol. 98, No 5, pp. 2607-2612, Novembre 1995.
20. G. CAMMARATA et alii, "A Neural Network Architecture for Noise Identification". Neural Network, Pergamon Press, vol. 8, No 6, pp 963-973, 1995, Ed. Pergamon.
21. G. CAMMARATA et alii, "Ottimizzazione della Metodologia di Inquinamento Acustico Tramite Reti Neurali", XXIV Congresso AIA, Trento 12-14 Giugno 1996.
22. G. CAMMARATA, A. FICHERA, S. GRAZIANI, L. MARLETTA, "Fuzzy Logic For Noise Pollution Evaluation", J. Acoust. Soc. Am. vol. 98, No 5, pp. 2607-2612, Novembre 1995.
23. G. CAMMARATA, S. CAVALIERI, A. FICHERA, "A Neural Network Architecture for Noise Identification". Neural Network, vol. 8, No 6, pp 963-973, 1995, Ed. Pergamon.
24. G. CAMMARATA et alii, "Ottimizzazione della metodologia di analisi di inquinamento acustico urbano tramite reti neurali", XXIV Convegno Nazionale AIA, Trento, 12 - 14 giugno 1996.

25. G. CAMMARATA, "Inquinamento acustico da traffico veicolare nelle città di Catania e Messina" - Progetto POP Sicilia 90/93 mod. 16.1.2.a, Istituto di Fisica Tecnica - Facoltà di Ingegneria di Catania, 1997
26. G. CAMMARATA, "Nuove metodologie per la modellistica del rumore urbano". Lipari 1997
27. G. CAMMARATA, "Rumorosità urbana da traffico veicolare nelle città di Catania e Messina", Conferenza sul rumore urbano, Catania, Gennaio 1998
28. G. CAMMARATA et alii, "Noise Prediction in Urban Traffic by a Neural Approach", International Workshop on Artificial Neural Networks , IWANN93, 9-11 June 1993, Sitges, Barcelona, Spain.
29. G. CAMMARATA et alii, "Neural Networks versus Regression Techniques for Noise Prediction in Urban Areas", World Congress on Neural Networks, WCNN 93, 11-15 July, Portland, Oregon, USA.
30. G. CAMMARATA et alii, "Self-Organising Map to Filter Acoustic Mapping Survey in Noise Pollution Analysis", IJCNN93, International Joint Conference on Neural Networks, Nagoya, Japan, October 25-29.
31. G. CAMMARATA, et alii, "Neural Network Versus Fuzzy Logic - Techniques for Modeling Urban Noise Pollution", 1996
32. G. CAMMARATA, "Modelli di inquinamento acustico da traffico veicolare nella città di Catania" - POP 90/93 Mod. B.16.2.1. Istituto di Fisica Tecnica - Facoltà di Ingegneria di Catania, 1997
33. G. CAMMARATA et alii: "Analisi dei parametri acustici oggettivi in alcuni teatri italiani (influenza del coefficiente di riflessione diffusa), Congresso Nazionale AIA, 1999
34. G. CAMMARATA et alii: "Banche dati e strumenti informatici per il controllo del rumore nei cantieri edili", Congresso Nazionale AIA 1999
35. ISPRA, POP Sicilia 90/93, Mod. B.16.2.2, Rapporto Tecnico N.9.
36. HEBB D.O., "The organisation of the behaviour, a neuropsychological theory", John Wiley, New York, 1949
37. MINSKY M., "Neural nets and the brain", Doctoral Dissertation, Princeton University, NJ, 1954
38. WIDOWS B., "Generalisation and information storage in networks of Adeline 'neurones', in self-organisation system.
39. WIDROW B. E. HOFF JR, "Adaptive switching circuits", 1960 IRE Western Electric Show and Convention Record, part 4 (Aug. 23): 96-104, 1960
40. MC CULLOCH W. S., W. H. PITTS, "A logical calculus of the ideas imminent in nervous activity", Bull. Math. Biophy. 5: 115-133, 1943
41. ROSEBLATT F., "The perceptron: a probabilistic model for information storage and organisation in the brain", Psych. Rev. 65: 386-408, 1958
42. MINSKY M., S. PAPER, "Perceptrons", Cambridge, Mass.: MIT Press, 1969
43. CYBENKO G., "Approximation by a superposition's of a sigmoidal function, Mathematics of control", Signal and Systems, Vol.2: 303-314, 1989
44. MC CLELLAND T.L., D.E. RUMELHART, "Parallel distributed processing", Cambridge: MIT Press and the PDP Research Group, 1986
45. ANZA PLUS, "User's Guide and Neurosoftware Documents", Release 2.22 June, 1989, Hetch Nielsen Neurocomputer.
46. J.L. MC CLELLAND AND D.E. RUMELHART, "Explorations in Parallel Distributed Processing", The MIT Press, pp.121-159.
47. D. BERTONI, A. FRANCHINI, M. MAGNONI, "Il Rumore Urbano e l'Organizzazione del Territorio", Pitagora Editrice Bologna, Italy, pp.45-69, 1987.
48. M.A. BURGESS, "Urban Traffic noise prediction from measurements in the metropolitan area of Sidney", Appl. Acoustics, 10, 1977,1.

49. R. JOSSE, "Notions d'Acoustique", Ed. Eyrolles, Paris, France.
50. S. CAVALIERI AND A. FICHERA, "Exploiting Neural Network Features to Model and Analyse Noise Pollution", 6th Italian Workshop on Neural Nets, May 12-14th, Vietri sul Mare, Salerno.
51. D. DE SIENO, "Adding a Conscience to Competitive Learning", Proceedings of the second annual IEEE ICNN, International Conference Neural Networks, Vol.1.
52. T. KOHONEN, "Self-organisation and Associative Memory", Springer-Verlag.
53. T. KOHONEN et al., "Statistical Pattern Recognition with Neural Networks: Benchmark Studies", Proceedings of the second annual IEEE ICNN, Vol.1.
54. LOFTI A. ZADEH, "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes", IEEE Trans. on Syst. Man and Cyb., Vol. SMC 3, No.1, 1973.
55. R. M. TONG, "A Control Engineering Review of Fuzzy Systems", Automatica, Vol. 13, pp. 559-569.
56. S. SUGENO, 1985 "Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modelling and Control", IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-15, No. 1, 1985.
57. A. FICHERA, L. FORTUNA, S. GRAZIANI, M. G. XIBILIA, "Neuro-Fuzzy Strategies for Urban Traffic Noise Monitoring", 1996
58. A. FICHERA, L. FORTUNA, S. GRAZIANI, M.G. XIBILIA, "Modelling urban traffic flow from noise measurement and neural networks", 1996
59. R. JOSSE, "Notion d'Acoustique", Ed. Eyrolles, Paris, 1972

## INDICE GENERALE

<b>1.</b>	<b><u>ACUSTICA TECNICA</u></b>	<b><u>1</u></b>
<b>2.</b>	<b><u>CENNI DI ACUSTICA FISICA</u></b>	<b><u>3</u></b>
2.1.	ACUSTICA FISICA	3
2.2.	LA CELERITÀ DEL SUONO	3
2.3.	ONDE PIANE E SFERICHE	4
2.4.	GRANDEZZE FONDAMENTALI PER L'ACUSTICA	6
2.4.1.	LUNGHEZZA D'ONDA E FREQUENZA	6
2.4.2.	POTENZA SONORA	7
2.4.3.	INTENSITÀ SONORA	8
2.5.	TIPO DI ONDE ACUSTICHE	8
2.6.	PROPAGAZIONE DELLE ONDE SONORE	9
2.6.1.	TONI PURI	12
2.6.2.	LE ARMONICHE	13
2.6.3.	SUONI COMPLESSI	13
	Oscillogrammi e spettri sonori	13
	Trasformazione dello spettro di un segnale	17
2.7.	SPETTRO DI UN SUONO COMPLESSO	19
2.7.1.	TRASFORMATA VELOCE DI FOURIER DI UN SEGNALE DIGITALE (FFT)	21
	Introduzione alla Trasformata di Fourier	21
	Digitalizzazione ed FFT	22
	Frames, Filtri e FFT di breve durata	22
2.7.2.	DEFINIZIONI DI BASE	24
	La Trasformata veloce di Fourier, FFT	24
	Zero Padding	25
	Pre - Emphasis	27
	Analisi di un suono puro	28
2.8.	INNALZAMENTO DEI LIVELLI CON L'ALLARGAMENTO DELLA FINESTRA	30
<b>3.</b>	<b><u>CENNI DI ACUSTICA FISIOLÓGICA</u></b>	<b><u>31</u></b>
3.1.	L'ACUSTICA FISIOLÓGICA	31
3.2.	LIVELLI SONORI	32
	Livello di Potenza sonora	32
	Livello di Pressione sonora	32
	Livello di Intensità acustica	33
	Livello di Densità sonora	33
3.3.	L'ORECCHIO UMANO	34
3.3.1.	SOGLIA UDIVA	41
3.3.2.	PERCEZIONE SOGGETTIVA DEL SUONO	42
3.4.	LIVELLI DI PRESSIONE PONDERATI- LE SCALE FONOMETRICHE	43
3.5.	LIVELLO EQUIVALENTE (LEQ)	45
3.6.	LOCALIZZAZIONE ACUSTICA	46
3.7.	SPECIALIZZAZIONE DELL'UDITO	48
<b>4.</b>	<b><u>TRASMISSIONE DEL SUONO</u></b>	<b><u>51</u></b>

<b>4.1. TRASMISSIONE DEL SUONO</b>	<b>51</b>
<b>4.2. ASSORBIMENTO, RIFLESSIONE, RIVERBERAZIONE, DIFFRAZIONE E RIFRAZIONE</b>	<b>51</b>
4.2.1. ASSORBIMENTO	52
4.2.2. RIFLESSIONE	53
4.2.3. TRASMISSIONE E POTERE FONOISOLANTE	53
<b>4.3. ASSORBIMENTO DEL SUONO ALLE BASSE FREQUENZE</b>	<b>56</b>
4.3.1. IL RISUONATORE DI HELMOLTZ	58
4.3.2. LE MEMBRANE ASSORBENTI	59
4.3.3. DIFFRAZIONE	61
4.3.4. BARRIERE ACUSTICHE	61
4.3.5. LA RIFRAZIONE	62
4.3.6. FATTORE DI DIREZIONALITÀ	63
<b>4.4. RIVERBERAZIONE ACUSTICA</b>	<b>64</b>
<b>4.5. ATTENUAZIONE DEI SUONI NELL'AMBIENTE INTERNO</b>	<b>69</b>
4.5.1. ATTENUAZIONE DELLE VIBRAZIONI PER RIDURRE LA RUMOROSITÀ AEREA	72
<b>4.6. ATTENUAZIONE DEI SUONI IN AMBIENTI APERTI</b>	<b>75</b>
4.6.1. DIVERGENZA SONORA	75
4.6.2. FATTORI ATMOSFERICI	75
4.6.3. ATTENUAZIONI DOVUTE A FATTORI NATURALI	76
<b><u>5. EFFETTI DEL RUMORE SULL'UOMO</u></b>	<b><u>78</u></b>
5.1. PARAMETRI DA CUI DIPENDE IL RUMORE	79
5.2. EFFETTI DEL RUMORE SUL CORPO UMANO	79
5.3. EFFETTI DEL RUMORE SULL'UDITO	80
5.4. EFFETTI DEL RUMORE SUL SONNO	81
5.5. DESCRITTORI ACUSTICI PER IL RUMORE	81
5.6. EFFETTI DELL'ESPOSIZIONE AL RUMORE NEGLI AMBIENTI LAVORATIVI.	82
<b><u>6. IL D.P.C.M. 1-3-91</u></b>	<b><u>86</u></b>
6.1. IL D.P.C.M. 01/03/1991	86
6.2. ATTIVITÀ ESCLUSE DAL DECRETO	87
6.3. LA ZONIZZAZIONE ACUSTICA	87
6.4. DEFINIZIONI FONDAMENTALI (ALLEGATO A)	88
6.5. IL CRITERIO DIFFERENZIALE	88
6.6. STRUMENTAZIONE E MODALITÀ DI MISURA	89
6.6.1. RICONOSCIMENTO DI COMPONENTI IMPULSIVE NEL RUMORE	89
6.6.2. RICONOSCIMENTO DEI COMPONENTI TONALI NEL RUMORE	90
6.6.3. PRESENZA DI COMPONENTI IMPULSIVE E TONALI NEL RUMORE.	91
6.7. DEFINIZIONI DEI TEMPI DI MISURA NEL DPCM 1-3-91.	91
6.8. COME EFFETTUARE LE MISURE	92
6.9. ADEGUAMENTO AI LIMITI DI RUMOROSITÀ	94
<b><u>7. IL D. LGS 277/91</u></b>	<b><u>95</u></b>
7.1. IL D.LGS. 277/91	95
7.2. OBBLIGHI PER I DATORI DI LAVORO E PER I LAVORATORI	96
7.3. OBBLIGHI DEL MEDICO COMPETENTE	96
7.4. CAP. IV: PREVENZIONE DEI LAVORATORI	97
7.5. VALUTAZIONE DEL RISCHIO	98
7.6. USO DEI MEZZI INDIVIDUALI DI PROTEZIONE	99
7.7. DEROGHE PER SITUAZIONI PARTICOLARI	99

<b>7.8. SCHEDA DI VALUTAZIONE DEL RUMORE</b>	<b>100</b>
<b>7.9. TEMPO DI ESPOSIZIONE E LIVELLO DI ESPOSIZIONE PERSONALE</b>	<b>101</b>
7.9.1. CRITERIO 3-DB	101
7.9.2. CRITERIO 5-DB	101
<b>7.10. STRUMENTI PER MISURARE IL LIVELLO DI ESPOSIZIONE</b>	<b>102</b>
<b>7.11. NORMATIVA NAZIONALE SULLA SICUREZZA DEI LAVORATORI PER IL RUMORE</b>	<b>103</b>
<b>7.12. METODI DI CALCOLO APPROSSIMATI DEL RISCHIO Uditivo.</b>	<b>103</b>
<b>7.13. PROTEZIONE DELL'UDITO: MISURE DI SICUREZZA</b>	<b>105</b>
<b>7.14. CUFFIE DI PROTEZIONE DAL RUMORE ED INSERTI ACUSTICI.</b>	<b>106</b>
7.14.1. DATI UTILI PER LA RUMOROSITÀ IN CANTIERE	107
7.14.2. VALORI DI RIFERIMENTO DELL'ISTITUTO DI FISICA TECNICA DI CATANIA	110
Caterpillar 320 NME Maia	111
Fiat Allis fl6	111
Escavatore CAT 953	112
Pala meccanica MF200B	112
Escavatore Komatsu d31s	113
Escavatore Fai 96edt	113
Escavatore JCB JS 160 NLC	114
Escavatore Yanmar B50	114
Cifa	115
Camion Mercedes 1517	115
Camion Astra H7d 84.42	116
Camion Iveco 380 E37	116
Autobetoniera Minerva 300 PC	117
Autobetoniera Astra BM305F	118
Rullo compressore Ursus Vitrax	118
Macchina piegaferro	119
Lavori di carpenteria	119
Macchina tagliaferro	119
Vibra cls elettrico	120
Rumore ambientale	120
Autobetoniera Iveco	121
Autopompa getta cls	121
7.14.3. DIRETTIVA 2003/10/CE DEL 06/02/03	122
Valori limite di esposizione:	122
<b><u>8. L. 447 DEL 26/10/95: LEGGE QUADRO SUL RUMORE</u></b>	<b><u>123</u></b>
<b>8.1. LA LEGGE QUADRO 447/95</b>	<b>123</b>
<b>8.2. DISPOSIZIONI IN MATERIA DI INQUINAMENTO ACUSTICO</b>	<b>124</b>
<b>8.3. IMPLICAZIONI SULLA SICUREZZA NEI LUOGHI DI LAVORO</b>	<b>124</b>
<b><u>9. CRITERI DI VALUTAZIONE DEL RUMORE</u></b>	<b><u>126</u></b>
<b>9.1. LE CURVE NOISE CRITERIA (NC)</b>	<b>126</b>
<b>9.2. LE CURVE NOISE RATING (NR)</b>	<b>127</b>
<b>9.3. VALORI DI RIFERIMENTO NC ED NR</b>	<b>127</b>
<b>9.4. NORMA ISO -R 1996 - COMPOSITE NOISE RATING</b>	<b>128</b>
<b><u>10. DPCM 14-11-97: LIMITI DI EMISSIONE, DI IMMISSIONE E DI QUALITÀ</u></b>	<b><u>131</u></b>
<b>10.1. D.P.C.M. 14-11-1997</b>	<b>131</b>
10.1.1. DETERMINAZIONE DEI VALORI LIMITE DELLE SORGENTI SONORE	132

<b>10.2. ZONIZZAZIONE ACUSTICA DI CATANIA</b>	<b>133</b>
<b><u>11. REQUISITI ACUSTICI DEGLI EDIFICI</u></b>	<b><u>135</u></b>
<b>11.1. I REQUISITI ACUSTICI DEGLI EDIFICI</b>	<b>135</b>
<b>11.2. REQUISITI ACUSTICI PASSIVI DEGLI EDIFICI</b>	<b>137</b>
11.2.1. TEMPO DI RIVERBERAZIONE	138
11.2.2. POTERE FONOISOLANTE	140
11.2.3. LEGGE DI MASSA PER INCIDENZA DIFFUSA	142
11.2.4. POTERE FONOISOLANTE APPARENTE: $R'_w$	142
11.2.5. PERCORSI DI TRASMISSIONE – PROPAGAZIONE PER VIA AEREA E STRUTTURALE	144
11.2.6. CORRETTA PROGETTAZIONE EDILIZIA	147
11.2.7. ISOLAMENTO ACUSTICO DI FACCIATA: $D2_{M,N,TW}$	148
11.2.8. INDICE DI VALUTAZIONE DEL POTERE FONOISOLANTE	148
11.2.9. LIVELLO RUMORE DI CALPESTIO DI SOLAI NORMALIZZATO: $L'_{NW}$	152
11.2.10. LIVELLO DI RUMORE DEGLI IMPIANTI A FUNZIONAMENTO DISCONTINUO: $L_{ASMAX}$	152
11.2.11. LIVELLO DI RUMORE DEGLI IMPIANTI A FUNZIONAMENTO CONTINUO: $L_{AEQ}$	152
11.2.12. ISOLAMENTO ACUSTICO	152
11.2.13. CONSIDERAZIONI SUI DESCRITTORI ACUSTICI	153
<b>11.3. VERIFICHE DI LEGGE PER DIVISORI E FACCIATE</b>	<b>155</b>
11.3.1. VERIFICA DEI DIVISORI	155
11.3.2. VERIFICA DELLE FACCIATE	156
11.3.3. VERIFICA DAL RUMORE DA CALPESTIO	157
11.3.4. INDICE DI VALUTAZIONE DEL LIVELLO DI CALPESTIO	159
11.3.5. VERIFICHE DI LEGGE PER I SOLAI: RIFERIMENTO UNI 8270 & UNI 8270 & UNI 8270	160
11.3.6. RIFERIMENTI ALLA PRECEDENTE LEGISLAZIONE	161
11.3.7. IL RUMORE PRODOTTO DAGLI IMPIANTI TECNOLOGICI	161
1. Servizi a funzionamento discontinuo:	161
2. Servizi a funzionamento continuo:	161
<b>11.4. CONSIDERAZIONI SUI REQUISITI ACUSTICI DEGLI EDIFICI</b>	<b>162</b>
<b>11.5. NORMA UNI 11367:2010</b>	<b>163</b>
<b>11.6. NORMA UNI 12354</b>	<b>165</b>
<b>11.7. SODDISFACIMENTO DEI REQUISITI ACUSTICI PASSIVI</b>	<b>165</b>
11.7.1. NECESSITÀ DELLA CULTURA DELLA VERIFICA E DEL CONTROLLO ACUSTICO	166
11.7.2. LA FIGURA DEL TECNICO COMPETENTE	167
11.7.3. ISOLAMENTO ACUSTICO IN PARALLELO	168
11.7.4. COLLAUDO ACUSTICO	169
<b>11.8. PREVISIONE DEL POTERE FONOISOLANTE</b>	<b>169</b>
11.8.1. POTERE FONOISOLANTE DELLE PARETI	169
11.8.2. POTERE FONOISOLANTE DEI SERRAMENTI	172
11.8.3. PREVISIONE DELL'ISOLAMENTO IMPATTIVO E DI CALPESTIO	172
Solai Omogenei	172
Pavimento con rivestimento	173
Pavimento galleggiante	174
Soffitti sospesi	174
11.8.4. CALCOLO DELL'ISOLAMENTO DI FACCIATA	174
<b>11.9. SOSPENSIONE DEI DM 5/12/1997</b>	<b>177</b>
<b><u>12. ACUSTICA AMBIENTALE</u></b>	<b><u>179</u></b>
<b>12.1. RUMORE AUTOVEICOLARE</b>	<b>179</b>
<b>12.2. SPETTRO DEL RUMORE VEICOLARE</b>	<b>180</b>
<b>12.3. MOTORI DI AEREO A REAZIONE E TURBOELICA</b>	<b>181</b>
<b>12.4. DESCRIZIONE DEL RUMORE DA TRAFFICO VEICOLARE</b>	<b>181</b>

<b>12.6. CORRELAZIONI STATISTICHE</b>	<b>182</b>
12.6.1. CORRELAZIONE DI JOSSE	182
12.6.2. CORRELAZIONE EMPA (SVIZZERA)	182
12.6.3. CORRELAZIONE CRTN (GRAN BRETAGNA)	184
12.6.4. CORRELAZIONE UE	185
12.6.5. CORRELAZIONE DEL CNR	185
Correlazione TURBO (Traffico Urbano Bologna)	185
<b>12.7. RUMORE FERROVIARIO</b>	<b>185</b>
<b>12.8. BARRIERE ACUSTICHE</b>	<b>186</b>
<b>12.9. NUOVE METODOLOGIE PER LA MODELLISTICA DEL RUMORE URBANO</b>	<b>190</b>
12.9.1. LE RETI NEURALI	190
12.9.2. I MODELLI NEURALI ACUSTICI	195
Modello 1	195
Modello 2	195
Modello 3	196
12.9.3. RISULTATI DELLE ELABORAZIONI NEURALI PER CATANIA	198
12.9.4. RISULTATI OTTENUTI PER LA CITTÀ DI MESSINA	201
<b>12.10. I MODELLI BIDIMENSIONALI DI PREVISIONE DEL RUMORE</b>	<b>204</b>
<b>12.11. IL MODELLO DI RUMOROSITÀ BASATO SULLA <i>FUZZY LOGIC</i></b>	<b>208</b>
12.11.1. INTRODUZIONE ALLA TEORIA DEGLI INSIEMI <i>FUZZY</i>	208
12.11.2. L'IMPLICAZIONE E L'ALGORITMO <i>FUZZY</i>	211
12.11.3. L'ALGORITMO <i>FUZZY</i> CON CONSEGUENTE LINEARE	215
12.11.4. DETERMINAZIONE DELL'ALGORITMO <i>FUZZY</i>	216
Creazione del Modello <i>Fuzzy</i>	216
12.11.5. ALGORITMO DI IDENTIFICAZIONE	217
12.11.6. IDENTIFICAZIONE DEI PARAMETRI DEI <i>CONSEQUENTI</i>	218
Identificazione dei parametri delle Premesse	218
Scelta delle Variabili delle Premesse	219
Algoritmo di Sugeno per la valutazione del rumore	220
Confronto fra il modello neurale e il modello <i>fuzzy</i>	220
<b>13. ACUSTICA DELLE SALE</b>	<b>223</b>
<b>13.1. L'ACUSTICA DELLE SALE</b>	<b>223</b>
<b>13.2. UN PO' DI STORIA DELLE SALE TEATRALI</b>	<b>229</b>
<b>13.3. IL PROFILO OTTIMALE DELLA SALA TEATRALE</b>	<b>235</b>
<b>13.4. QUALITÀ ACUSTICHE PROPOSTE DA L. BERANEK</b>	<b>239</b>
13.4.1. IL CRITERIO PROGETTUALE DI L. BERANEK	240
<b>13.5. LE PROBLEMATICHE DI UNA SALA MUSICALE</b>	<b>240</b>
<b>13.6. LE VARIABILI IN GIOCO</b>	<b>240</b>
Le variabili fisico-oggettive	241
Le variabili soggettive	241
13.6.1. ECCEZIONALITÀ DI UN EVENTO MUSICALE	241
<b>13.7. IL COMPORTAMENTO IDEALE DI UNA SALA</b>	<b>242</b>
<b>13.8. IL FENOMENO DELL'INTERFERENZA</b>	<b>242</b>
<b>13.9. I DESCRITTORI ACUSTICI OGGETTIVI</b>	<b>243</b>
13.9.1. TEMPO DI RIVERBERAZIONE	243
13.9.2. TEMPO DI RIVERBERAZIONE STATISTICO	247
13.9.3. CARATTERISTICHE DEL TEMPO DI RIVERBERAZIONE	248
13.9.4. VALORI SPERIMENTALI DEI FATTORI DI ASSORBIMENTO	251
13.9.5. RIFLESSIONE E DIFFUSIONE ACUSTICA DELLE PARETI	251
13.9.6. UTILIZZO DEI MATERIALI ALL'INTERNO DELLA SALA	252
<b>13.10. DISTRIBUZIONE DEL LIVELLO SONORO</b>	<b>254</b>
13.10.1. LE PROBLEMATICHE DEI DESCRITTORI OGGETTIVI	254
<b>13.11. NUOVO APPROCCIO ALL'ACUSTICA DELLE SALE</b>	<b>255</b>

13.11.1.	INFORMAZIONI OTTENIBILI DALLA RISPOSTA IMPULSIVA	257
<b>13.12.</b>	<b>I DESCRITTORI ACUSTICI PRINCIPALI</b>	<b>260</b>
<b>13.13.</b>	<b>EARLY DECAY TIME (EDT)</b>	<b>261</b>
<b>13.14.</b>	<b>CHIAREZZA O (C80) EARLY-TO-LATE SOUND INDEX</b>	<b>261</b>
<b>13.15.</b>	<b>INDICE DI DEFINIZIONE (D) E DI EFFICIENZA LATERALE (LE)</b>	<b>262</b>
<b>13.16.</b>	<b>IL RAPPORTO S/N DI LOCHNER E BURGER</b>	<b>263</b>
<b>13.17.</b>	<b>STABILITÀ E AFFIDABILITÀ DEI DESCRITTORI OGGETTIVI</b>	<b>264</b>
<b>13.18.</b>	<b>SPAZIO OGGETTIVO E SOGGETTIVO DI UNA SALA</b>	<b>265</b>
13.18.1.	EFFETTI DELLE ONDE DIRETTE E DELLE RIFLESSIONI	267
13.18.2.	INTERPRETAZIONE Uditiva delle Riflessioni	268
13.18.3.	COMBINAZIONE DEI CAMPI DIRETTI E DIFFUSI	269
13.18.4.	EFFETTI DEL RIVERBERO SULL'INTELLEGIBILITÀ	270
<b>13.19.</b>	<b>PRESENTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE OGGETTIVE</b>	<b>271</b>
<b>13.20.</b>	<b>GLI SPAZI SOGGETTIVI</b>	<b>272</b>
13.20.1.	CRITERIO DELLE PREFERENZE SOGGETTIVE DI Y. ANDO	273
13.20.2.	RELAZIONI FRA PARAMETRI OGGETTIVI E SOGGETTIVI	274
13.20.3.	SPAZIO FISICO E SPAZIO ACUSTICO	274
<b>13.21.</b>	<b>EFFETTI PSICOACUSTICI DELLE RIFLESSIONI IMMEDIATE</b>	<b>275</b>
<b>13.22.</b>	<b>SOLUZIONI ARCHITETTONICHE</b>	<b>278</b>
13.22.1.	REGOLE DI PROGETTAZIONE	280
<b>13.23.</b>	<b>I CAD ACUSTICI</b>	<b>281</b>
13.23.1.	UTILIZZO DELL'ACUSTICA GEOMETRICA	282
	Metodo delle sorgenti immagini e Ray Tracing	284
	Metodo MIS	285
	Metodo Ray Tracing	286
	Cone Tracing	286
	Raggi conici pesati	287
13.23.2.	EFFETTO DELLA RIVERBERAZIONE ACUSTICA	288
13.23.3.	EFFETTI DELLA DIFFRAZIONE ACUSTICA	289
<b>13.24.</b>	<b>CAD ACUSTICI COMMERCIALI</b>	<b>289</b>
	CAD grafico interno	291
	CAD Grafico esterno	291
	CAD Interno ridotto	291
13.24.1.	ESEMPIO DI CAD ACUSTICO - RAMSETE	292
13.24.2.	CAD ACUSTICO – CATT ACOUSTICS	294
	Nuovo Teatro Sangiorgi di Catania	295
	Teatro Bellini di Catania	300
	Descrizione della geometria in CATT Acoustics	304
	Dati di Calcolo e Output	307
	Visualizzazione dei risultati	308
13.24.3.	INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI DELLE SIMULAZIONI	314
13.24.4.	STRUMENTI DI VALUTAZIONE	314
<b>13.25.</b>	<b>STRUMENTI VIRTUALI PER L'ACUSTICA DELLE SALE</b>	<b>315</b>
<b>13.26.</b>	<b>LABORATORIO VIRTUALE DI ACUSTICA LA.V.A.®</b>	<b>318</b>
	Catena di rilevazione	320
	Procedura di misura	321

---

## **14. IL LINGUAGGIO PARLATO** **323**

<b>14.1.</b>	<b>NATURA DEL LINGUAGGIO PARLATO</b>	<b>323</b>
14.1.1.	NATURA DEL LINGUAGGIO PARLATO	324
14.1.2.	EFFETTI DELLA DIREZIONALITÀ DEL LINGUAGGIO PARLATO	325
14.1.3.	PROBLEMATICHE DEL PARLATO ALL'APERTO	325
14.1.4.	PROBLEMATICHE DEL PARLATO NELLE SALE CHIUSE	326
14.1.5.	SPEECH TRANSMISSION INDEX, <i>STI</i>	328

14.1.6.	CONVERSIONE DELLO <i>STI</i> IN MISURA DELL'INTELLIGIBILITÀ	330
14.1.7.	METODOLOGIE DI CALCOLO DELLO <i>STI</i>	331
14.1.8.	MODALITÀ DI CALCOLO DEL <i>RASTI</i>	333
14.1.9.	PROPRIETÀ DIAGNOSTICHE DELLE <i>MTF</i> ED USO DELLO <i>STI</i>	333
14.1.10.	EFFETTI DEL RUMORE DI FONDO	333
14.1.11.	EFFETTI DEL RUMORE DELLA RIVERBERAZIONE	334
14.1.12.	EFFETTI DELLE RIFLESSIONI RITARDATE	335
14.1.13.	IL CRITERIO DEL LIVELLO TOTALE DEL PARLATO PER I TEATRI	336
14.1.14.	<i>NUOVA TEORIA</i> DELLA TRASMISSIONE SONORA PER IL LINGUAGGIO PARLATO	337
<b>14.2.</b>	<b>ELEMENTI DI ACUSTICA FONETICA</b>	<b>339</b>
14.2.1.	LE ONDE SONORE	340
14.2.2.	FREQUENZE DELL'UDITO	341
14.2.3.	LE FORMANTI FONETICHE	341
14.2.4.	GLI SPETTROGRAMMI	342
<b>14.3.</b>	<b>METODOLOGIA PER IL RICONOSCIMENTO DI UN PARLATORE</b>	<b>345</b>
<b>14.4.</b>	<b>QUALITÀ DEI SEGNALI ACUSTICI</b>	<b>347</b>
<b>14.5.</b>	<b>LO STRUMENTO DI ANALISI FONOMETRICA</b>	<b>353</b>
14.5.1.	USO DI SOUNDSCOPE®	355
<b>14.6.</b>	<b>METODO DELLE ZONE DI ESISTENZA</b>	<b>357</b>
<b>14.7.</b>	<b>CONFRONTO SUI METODI PER IL RICONOSCIMENTO DEL PARLATORE</b>	<b>358</b>
14.7.1.	METODO DEL RICONOSCIMENTO Uditivo	359
14.7.2.	METODO BASATO SU VOICEPRINT IDENTIFICATION	360
<b>15.</b>	<b><u>CONTROLLO DEL RUMORE NEGLI IMPIANTI</u></b>	<b>361</b>
<b>15.1.</b>	<b>METODOLOGIE DI CALCOLO DELLA RUMOROSITÀ DEGLI IMPIANTI</b>	<b>361</b>
15.1.1.	RUMORE PRODOTTO IN AMBIENTE ESTERNO	362
15.1.2.	VALUTAZIONE DEL RUMORE MEDIANTE LE CURVE <i>NR</i> ED <i>NC</i>	366
15.1.3.	VALUTAZIONE DEL RUMORE ALL'INTERNO DI AMBIENTI CHIUSI	367
15.1.4.	CALCOLO DEL LIVELLO SONORO EMESSE DA UN VENTILATORE	369
15.1.5.	ATTENUAZIONE SONORA IN CANALI METALLICI COIBENTATI	370
	Canali dritti	371
	Gomiti	372
	Diramazioni	374
	Terminali di condotto	374
	Plenum	375
	Corretta esecuzione della posa in opera dei canali	376
<b>15.2.</b>	<b>ATTENUAZIONE DEL RUMORE NEI CONDOTTI</b>	<b>377</b>
	Posizionamento dei silenziatori	379
<b>16.</b>	<b><u>RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI</u></b>	<b>381</b>
	Pubblicazioni	382

### INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Teatro del Palazzo di Cnosso, Creta: La forma è solo funzionale alla visione	2
Figura 2: Teatro di Epidauro: La forma è funzionale all'Acustica del Teatro	3
Figura 3: Il corno di Alessandro Magno	2
Figura 4: Esempi di onda sonora piana e sferica	5
Figura 5: Esempio di propagazione di onde acustiche: inizialmente sferiche e poi piane a grandi distanze	5
Figura 6: Legame fra lunghezza d'onda e frequenza nel campo dell'udibile	6
Figura 7 : Rappresentazione spettrale dei suoni.	14
Figura 8: Rappresentazione delle bande acustiche di ottava e terzi di ottava	15
Figura 9: Rappresentazione di un suono puro nel piano ampiezza-tempo e nel piano ampiezza-frequenza.	15
Figura 10: Rappresentazione temporale della somma di tre armoniche	16
Figura 11: Composizione di tre armoniche nel piano ampiezza-tempo	16
Figura 12: Composizione di tre armoniche nel piano ampiezza-frequenza.	17
Figura 13: Azione dei filtri sui segnali	18
Figura 14: Rappresentazione di un segnale nei vari piani.	19
Figura 15- Spettrogramma della parola [AIUOLE].	19
Figura 16- Oscillogramma della parola [Aiuole] pronunciata da un parlatore	20
Figura 17: Rappresentazione spettrale di un suono complesso: la vocale [a].	20
Figura 18: Rappresentazione spettrale convenzionale: sonogramma	21
Figura 19: Errore di troncamento dei segnali	25
Figura 20: Rappresentazione della funzione di Hamming per $\omega T_0=40$	26
Figura 21: Spettrogramma di della parola [aiuole]	26
Figura 22: Sezione dello spettrogramma con finestra di pesatura triangolare	27
Figura 23: Stessa sezione precedente ma con finestra di Hamming	27
Figura 24: Stessa sezione trattata con finestra di Blackmann - Harris	27
Figura 25: Suono puro a 452 Hz	28
Figura 26: Spettro FFT del suono puro a 452 Hz	28
Figura 27: Rappresentazione di un suono complesso	29
Figura 28: Analisi FFT del suono complesso	29
Figura 29: Rappresentazione dell'analisi frequenziale a varie larghezze di banda	30
Figura 30: Vista d'Artista di un orecchio umano: orecchio esterno, medio e interno.	34
Figura 31: Struttura dell'orecchio esterno (padiglione auricolare) e dell'orecchio interno (Organo del Corti)	34
Figura 32: Struttura dell'orecchio interno e della coclea	35
Figura 33: Eccitazione delle terminazioni nervose	36
Figura 34: Funzioni di trasferimento dell'orecchio esterno.	37
Figura 35 :Funzione di trasferimento dell'orecchio interno (Von Békésy)	37
Figura 36: Funzioni di trasferimento del canale timpanico	38
Figura 37: Struttura di un neurone.	38
Figura 38: Segnale di attivazione sinaptico.	39
Figura 39: Curve isofoniche per toni puri (audiogramma normale di Fletcher - Munson)	39

Figura 40: Confronto fra la funzione di trasferimento dell'orecchio medio e l'audiogramma normale	40
Figura 41: Curva di udibilità reale di un soggetto e confronto con la curva di soglia standard	41
Figura 42: Esempio di audiogramma di un soggetto normale	42
Figura 43: Confronto fra le curve fonometriche e l'Audiogramma normale	43
Figura 44: Diagramma a blocchi di un fonometro e un moderno modello commerciale	44
Figura 45: Spettro a banda di ottava del segnale non filtrato e di quello filtrato	45
Figura 46: Andamento del LPS, Leq, L picco non pesato.	46
Figura 47: Localizzazione della sorgente sonora	47
Figura 48: Tempi di autocorrelazione dei brani di Y. Ando	49
Figura 49: Brani F e G di Y. Ando e loro funzioni di autocorrelazione	50
Figura 50: Bilancio di energia sonora	52
Figura 51: Andamento di alcuni fattori di assorbimento per materiali da costruzione.	53
Figura 52: Riflessione di un'onda sonora	53
Figura 53: valutazione del potere fonoisolante di un divisorio	54
Figura 54: Andamento del potere fonoisolante	54
Figura 55: Frequenze critiche di alcuni materiali	56
Figura 56: Cavità risonante	58
Figura 57: Materiale da costruzione utilizzato come cavità risonante	59
Figura 58: Tipologie di cavità risonanti di utilizzo comune	59
Figura 59: Assorbimento di una membrana	60
Figura 60: Esempio di membrana assorbente realizzata con pannelli in legno	60
Figura 61: Diffrazione del suono da parte di un ostacolo	61
Figura 62: Schema di barriera	62
Figura 63: Andamento dell'attenuazione in funzione del numero di Fresnel	63
Figura 64: Rifrazione di un'onda sonora.	63
Figura 65: Definizione del fattore di direzionalità	63
Figura 66: Propagazione di un'onda sonora all'interno di una stanza	65
Figura 67: Schematizzazione di 200 raggi sonori riflessi in un ambiente chiuso	65
Figura 68: Esempio di un teatro	66
Figura 69: Situazione delle riflessioni dopo 1 s dall'avvio della sorgente	66
Figura 70: Situazione delle riflessioni dopo 2 s dall'avvio della sorgente	67
Figura 71: Ecogramma in una sala chiusa	68
Figura 72: Decadimento sonoro all'interno di una sala	68
Figura 73: Il Teatro Roy Thompson Hall, Toronto	69
Figura 74: Andamento del livello interno in una sala per effetto del livello diretto e riverberato.	71
Figura 75: Esempio di applicazione di cuffia afonica	71
Figura 76: Tipologia di cuffia afonica per macchina operatrice	72
Figura 77: Cuffie afoniche per macchine con flussi di materiali entranti e/o uscenti	73
Figura 78: Esempi di isolatori per la riduzione delle vibrazioni	74
Figura 79: Esempio di pavimento galleggiante	74
Figura 80: Effetti del gradiente di temperatura	77
Figura 81: Short Equivalent Level	82
Figura 82: Andamento del NITTS in funzione del tempo di esposizione al rumore e suo recupero.	83

Figura 83: Perdita dell'udito per lavoratori con anzianità lavorativa compresa fra 1 e 39 anni esposti a 80 dB.A	83
Figura 84: Probabilità di handicap uditivo data dal NIOSH	84
Figura 85: Audiogramma con danno di Bruel	84
Figura 86: Innalzamento della soglia uditiva per una hostess con 20 anni di servizio	85
Figura 87: Soglia uditiva di un soggetto normale	85
Figura 88: Andamento del LPS e del Leq.	89
Figura 89: Rilevamento delle componenti impulsive secondo il DPCM 1-3-91	90
Figura 90: Criterio dell'abbassamento di -5 dB al valore di picco.	90
Figura 91: Rilievo di una componente tonale come indicato dal DPCM 1-3-91	91
Figura 92: Tempo di riferimento, di osservazione e di misura secondo il DPCM 1-3-91	92
Figura 93: Tecnica di misurazione in corrispondenza di un ventre e di un nodo	93
Figura 94: Andamento del LPS, del Leq e del livello massimo di picco non pesato.	98
Figura 95: Dosimetro personale per il rumore	102
Figura 96: Risultati ottenibili mediante un dosimetro personale.	102
Figura 97: Cuffia di protezione dal rumore conforme alle specifiche del D.Lgs 277/91	106
Figura 98: Modalità di misura dei livelli di potenza	110
Figura 99: Curve NC per la valutazione del rumore.	127
Figura 100: Curve di valutazione NR	128
Figura 101: Zonizzazione acustica di Catania	134
Figura 102: Interazione dell'edificio con l'ambiente sonoro	136
Figura 103: Apparato sperimentale per la misura del tempo di riverberazione $T_{60}$	139
Figura 104: Esempi di code sonore alle varie frequenze	139
Figura 105: Disposizione sperimentale per la misura del Potere Fonoisolante	140
Figura 106: Andamento tipico del potere fonoisolante in funzione della frequenza.	141
Figura 107: Frequenza critica per alcuni materiali al variare dello spessore	141
Figura 108: Legge di massa per incidenza diffusa	142
Figura 109: Legge di massa apparente di elementi edilizi	142
Figura 110: Confronto fra le diverse definizioni di potere fonoisolante	143
Figura 111: Esempio di Certificazione del Potere Fonoisolante	144
Figura 112: Percorsi di trasmissione del suono	145
Figura 113: Trasmissione del rumore negli ambienti	145
Figura 114: Rumore generato nelle reti di scarico	146
Figura 115: Trasmissione dei rumori delle reti di scarico	147
Figura 116: Corretta disposizione degli ambienti	148
Figura 117: Curva limite per divisori e facciate	149
Figura 118: Esempio di determinazione dell'indice di valutazione	149
Figura 119: Posizionamento della sorgente sonora e del fonometro	150
Figura 120: Layout dello schema di misura	150
Figura 121: Sequenza delle operazioni	151
Figura 122: Posizioni di misura per il potere fono isolante	151
Figura 123: Requisiti per le posizioni di misura	152
Figura 124: Misure da effettuare per la verifica dei requisiti minimi passivi	155
Figura 125: Posizioni di misura delle prestazioni acustiche di facciata	156
Figura 126: Macchina normalizzata di Calpestio - Sezione	157

Figura 127: Macchina normalizzata di calpestio	157
Figura 128: Posizioni di misura per il livello di calpestio	158
Figura 129: Curva limite per i solai	159
Figura 130: Esempio di determinazione dell'indice di valutazione	160
Figura 131: Vie di trasmissione laterale e ponti acustici	166
Figura 132: Percorso operativo del Tecnico Competente	167
Figura 133: Competenze del Tecnico Competente	168
Figura 134: Isolamento in parallelo	168
Figura 135: Modello di trasmissione del rumore fra ambienti	170
Figura 136: Modello semplificato per i giunti	171
Figura 137: Schematizzazione della procedura di calcolo	175
Figura 138: Tipologia di facciate	176
Figura 139: Limiti prestazionali dell'isolamento di una facciata	176
Figura 140: Rumorosità del veicolo al variare della velocità	180
Figura 141: Spettro dei rumori di auto e veicoli pesanti secondo CSTB	180
Figura 142: Schema di una turbina di aereo	181
Figura 143: Correzione per pendenza della strada	182
Figura 144: Correzione per assorbimento del terreno assorbente	183
Figura 145: Assorbimento con terreno riflettente	184
Figura 146: Criterio di progetto semplificato di barriere acustiche	187
Figura 147. Barriere in policarbonato trasparenti	188
Figura 148: Barriere acustiche in metallo o in cemento	189
Figura 149: Il neurone artificiale	191
Figura 150: la funzione a sigmoide utilizzata	191
Figura 151: Per la rete neurale a) sono indicati lo stato di attivazione dei neuroni e il valore dei pesi durante l'allenamento	192
Figura 152 - Un esempio di perceptrone multistrato con uno strato di neuroni hidden.	193
Figura 153: Rete neurale per analisi del rumore a 6 variabili di input e 1 di output	199
Figura 154 - Valori di $m_{sa}$ per i diversi modelli in funzione del numero di neuroni nascosti	200
Figura 155- Confronto tra i valori di $L_{eq}$ misurati con quelli ottenuti in fase di test con i modelli neurali	201
Figura 156: Variazione del $L_{eq}$ in funzione del numero di auto nei modelli esaminati	201
Figura 157: valori di $m_{sa}$ in funzione del numero di neuroni nascosti.	202
Figura 158: confronto tra le misure e le stime effettuate dalle reti per Messina	203
Figura 159: confronto tra le misure di Messina e le stime effettuate dalle reti di Catania.	203
Figura 160 – Mappa dell'area di studio di Catania utilizzata per il modello bidimensionale	204
Figura 161– Distribuzione dei livelli sonori simulati nella 1° zona di calcolo.	205
Figura 162 - Distribuzione dei livelli sonori simulati nella 2° zona di calcolo.	206
Figura 163 - Distribuzione dei livelli sonori simulati nella 3° zona di calcolo.	207
Figura 164: Definizione della funzione di appartenenza di un insieme fuzzy	208
Figura 165: Rappresentazione crisp di temperatura	209
Figura 166: Funzione di appartenenza dei due fuzzy set $x$ is media AND $x$ is grande	210
Figura 167: Funzione di appartenenza del fuzzy set, $x$ is media OR $x$ is grande	210
Figura 168: Funzione di appartenenza del fuzzy set, $x$ is media and $x$ is grande	210
Figura 169: Funzione di appartenenza del fuzzy set $x$ is not grande	210

Figura 170: Rappresentazione grafica della regola fuzzy if x is media then y is grande	211
Figura 171: Esempi di calcolo del conseguente di una regola utilizzando il metodo del troncamento	212
Figura 172: Esempi di calcolo del conseguente di una regola utilizzando il metodo del prodotto	212
Figura 173: Rappresentazione grafica della regola: if x is media and y is grande then k is grande	213
Figura 174: Esempio del calcolo dell'uscita di un'implicazione fuzzy contenente due fuzzy set nell'antecedente	213
Figura 175: Esempio di algoritmo fuzzy, costituito da due regole	214
Figura 176: Determinazione dell'uscita di un algoritmo fuzzy con il metodo del troncamento	215
Figura 177: Esempio di implicazione proposta in Sugeno	216
Figura 178: Caratterizzazione di una funzione di appartenenza di tipo lineare	217
Figura 179: Organizzazione della scelta delle variabili delle premesse	220
Figura 180– Regole fuzzy per il modello di rumorosità urbana di Catania	221
Figura 181- Confronto fra modelli fuzzy, statistico e valori misurati per Catania	221
Figura 182– Confronto fra i modelli neurale e fuzzy	222
Figura 183: Teatro di Cnosso (Creta)	224
Figura 184: Propagazione delle onde acustiche in un teatro all'aperto	225
Figura 185: Costruzione di Vitruvio per i teatri all'aperto	225
Figura 186: Teatro di Epidauro (Grecia)	226
Figura 187: Teatro greco di Siracusa	227
Figura 188: Teatro greco di Segesta	228
Figura 189: Riflessioni multiple nella sala IRCAM di Parigi	229
Figura 190: Dipinto del Canaletto della Rotunda di Ranelagh Garden	230
Figura 191: Teatro Scientifico di Mantova, Galli Bibiena 1761	231
Figura 192: Concert Hall di Boston	231
Figura 193: Royal Albert Hall di Londra (1851)	232
Figura 194: Musikverein di Vienna	232
Figura 195: Teatro Bayreuth di Monaco	233
Figura 196: Teatro San Carlo di Napoli	233
Figura 197: Roy Thompson Hall di Toronto	234
Figura 198: Muziekcentrum Vredenburg di Utrecht	235
Figura 199: Tracciamento del profilo verticale di una sala	236
Figura 200: Schema progettuale geometrico delle sale teatrali	236
Figura 201: Pianta circolare per teatri	237
Figura 202: Fattore di assorbimento dell'aria	245
Figura 203: Variazione della celerità dell'aria con la temperatura	245
Figura 204: Esempio di sala teatrale con galleria	248
Figura 205: Forma emisferica della copertura con effetto concentrante	249
Figura 206: Tempi di riverberazione ottimali per vari usi della sala	250
Figura 207: Tempo di riverberazione ottimale di una sala	250
Figura 208: Comportamento riflessivo e diffusivo dei materiali	251
Figura 209: Esempio di materiali diffondenti	252
Figura 210: Ecogramma tipo di una sala teatrale	252
Figura 211: Esempio di riflessione ritardata per effetto di riflessioni multiple laterali	253

Figura 212: Esempio di riflessione ritardata per effetto di riflessioni multiple delle pareti di fondo	253
Figura 213: Schematizzazione del nuovo approccio all'Acustica delle Sale	255
Figura 214: Risposta impulsiva di una sala	257
Figura 215: Risposta impulsiva logaritmica	257
Figura 216: Schematizzazione della risposta impulsiva: Il refllettogramma	258
Figura 217: Calcolo dei descrittori oggettivi dalla risposta impulsiva: Integrale inverso di Schröder	258
Figura 218: Esempio di calcolo sperimentale del Tempo di Riverberazione	259
Figura 219: Tempo di riverberazione con volumi accoppiati	260
Figura 220: Fattore $\alpha(t)$ di Lochner e Burger	263
Figura 221: Esempio di una moderna sale sinfonica	266
Figura 222: Effetto delle riflessioni	268
Figura 223: Rappresentazione dell'ITDG	268
Figura 224: Combinazione dei campi diretti e diffusi	269
Figura 225: Effetti combinati delle onde dirette e riflesse in un ambiente chiuso	270
Figura 226: Effetti del riverbero sull'intelligibilità	271
Figura 227: Scheda riepilogativa dei descrittori oggettivi di una sala	272
Figura 228: Vettori delle preferenze	273
Figura 229: Relazioni fra spazio fisico e spazio acustico	275
Figura 230: Percorso di un'onda riflessa	276
Figura 231: Effetti dell'angolo di inclinazione delle pareti	277
Figura 232: Ellissi di pari ITDG	277
Figura 233: Effetto dell'altezza del soffitto sul percorso delle onde riflesse	278
Figura 234: Possibili soluzioni architettoniche	279
Figura 235: Uso degli schermi correttivi	279
Figura 236: Sistemazione della Fossa Orchestrale	280
Figura 237: Lunghezza d'onda in funzione della frequenza	282
Figura 238: Costruzione del punto immagine	283
Figura 239: Esempio di posizionamenti delle immagini sorgenti	283
Figura 240: Applicazione del metodo delle sorgenti immagini	284
Figura 241: Sorgenti immagini calcolate nella figura precedente	285
Figura 242: Schematizzazione del metodo MIS	285
Figura 243: Schematizzazione del metodo Ray Tracing	286
Figura 244: Schematizzazione del Cone Tracing	286
Figura 245: Schematizzazione del metodo dei raggi conici pesati	287
Figura 246: Condizioni geometriche per i raggi conici	287
Figura 247: Visualizzazione della zona degli ecogrammi e della coda sonora (riverberazione)	288
Figura 248: Metodo di Kurze - Anderson	289
Figura 249: Esempio di modellazione di una sala	292
Figura 250: Modellazione trasversale di una chiesa	292
Figura 251: Altra modellazione trasversale di una chiesa	293
Figura 252: Risposta impulsiva calcolata	293
Figura 253: Curva di decadimento calcolata	293
Figura 254: Calcolo dei tempi di riverberazione	294

Figura 255: Disposizione dei punti di ascolto	294
Figura 256: Rappresentazione 3D del Teatro Sangiorgi di Catania	295
Figura 257: Posizionamento delle sorgenti e dei punti di ascolto	296
Figura 258: Rappresentazione 3D con raggruppamento delle pareti	296
Figura 259: Rappresentazione 3ED del Teatro Sangiorgi di Catania	297
Figura 260: Vista laterale 3D del Teatro Sangiorgi di Catania	297
Figura 261: Vista dalla parete di fondo del Teatro Sangiorgi di Catania	298
Figura 262: Sezione 3D del palco e della sala	298
Figura 263: Sezione longitudinale	299
Figura 264: Vista della parete di fondo	299
Figura 265: Alcuni risultati della simulazione del Teatro Sangiorgi di Catania	300
Figura 266: Ecogramma calcolato per il Teatro Sangiorgi di Catania	300
Figura 267: Vista 3D del Teatro Bellini	300
Figura 268: Vista 3D del palco e della sala	301
Figura 269: Particolare del palco e del transetto	301
Figura 270: Posizionamento delle sorgenti e dei punti di ascolto	302
Figura 271: Risultati di calcolo per il Teatro Bellini di Catania	302
Figura 272: Ecogramma e alcuni percorsi con riflessioni laterali	303
Figura 273: Ecogramma e riflessione della parete di fondo	303
Figura 274: Ecogramma calcolato per il Teatro Bellini di Catania	304
Figura 275: Sala esempio per il Geo File	305
Figura 276: File MASTER.GEO della forma di esempio	305
Figura 277: Rappresentazione del Teatro di esempio	306
Figura 278: Direttività della sorgente	306
Figura 279: Selezione dei materiali	307
Figura 280: Elenco dei files prodotti dal calcolo	307
Figura 281: Selezione dei parametri da calcolare	308
Figura 282: Tempo di Riverberazione simulato a varie frequenze	309
Figura 283: Curva di decadimento, Ecogramma e parametri oggettivi calcolati a 125 Hz	310
Figura 284: Curva di decadimento, Ecogramma e parametri oggettivi calcolati a 1000 Hz	310
Figura 285: Curva di decadimento, Ecogramma e parametri oggettivi calcolati per tutte le bande	311
Figura 286: Parametri oggetti calcolati	311
Figura 287: Reflectogrammi e percorsi delle onde riflesse	312
Figura 288: Distribuzione di alcuni parametri oggettivi	313
Figura 289: Calcolo di RT nei vari punti di ascolto	314
Figura 290: Esempio di calcolo automatico di descrittori oggettivi	315
Figura 291: Esempio di strumento virtuale per la risposta impulsiva	316
Figura 292: Calcolo dei descrittori oggettivi con lo strumento virtuale	316
Figura 293: Costruzione dello strumento virtuale	317
Figura 294: Altro esempio di costruzione dello strumento virtuale	317
Figura 295: Gerarchia dello strumento virtuale LA.V.A.	318
Figura 296: Definizione dello strumento virtuale con il linguaggio grafico G.	319
Figura 297: Selezione della metodologia LOG SWEEP	319
Figura 298: Oscillogramma della risposta impulsiva	320

Figura 299: Integrale di Schröder	321
Figura 300: Risposta FFT calcolata da LA.V.A.	321
Figura 301: Quadro dei risultati	322
Figura 302: Mascheramento delle consonanti da parte di una vocale	327
Figura 303: Scala di giudizio di ascolto al variare di STI	329
Figura 304: Relazione fra l'indice STI e l'English Word Intelligibility (EWI)	330
Figura 305: Relazione fra STI e l'indice %ALcons	330
Figura 306: Metodo normale di calcolo dello STI	331
Figura 307: Fattori relativi di peso per le MTF	333
Figura 308: MTF per alcuni valori del rapporto Segnale/Rumore	334
Figura 309: Interazione della riverberazione con le funzioni di modulazione	334
Figura 310: Combinazione della funzione modulata diretta e riflessa con ritardo	335
Figura 311: Interazione della Modulazione con le riflessioni ritardate	336
Figura 312: Curve NC per il massimo rumore di fondo	337
Figura 313: Forma d'onda complessa e sua scomposizione in forme elementari.	340
Figura 314: Formanti di una vocale, di un suono periodico sinusoidale e a gradino.	342
Figura 315: Sonogramma della parola [AI] e delle formanti delle vocali A ed I.	343
Figura 316: Spettrogramma della parola [AIUOLE].	344
Figura 317: Oscillogramma della parola [Aiuole] pronunciata da un parlatore	344
Figura 318: Spettrogramma della parola [AIUOLE] pronunciata da un parlatore	345
Figura 319: Spettrogramma della parola [CIERTU] pronunciata al telefono	346
Figura 320: Spettrogramma della parola [CIERTU] pronunciata dal CTU	347
Figura 321: Oscillogramma di un suono di sintesi a cinque frequenze	348
Figura 322: Sezione spettrografica del suono a 5 armoniche	349
Figura 323: Sezione spettrografica del segnale filtrato su banda telefonica	349
Figura 324: Segnale composto da quattro onde quadre di 200, 400, 600, 800 e 1000 Hz	350
Figura 325: Spettrogramma del segnale composto di 5 onde quadre	350
Figura 326: Segnale a cinque onde quadre filtrato su banda telefonica	351
Figura 327: Spettrogramma del segnale a onde quadre filtrato su banda telefonica	351
Figura 328: Oscillogramma del segnale a 5 armoniche con sovrassaturazione	352
Figura 329: Sezione spettrografica del segnale sovrassaturato	352
Figura 330: Consolle di comando del software di analisi formantica	354
Figura 331: Finestra di informazione dei valori delle formanti selezionate	355
Figura 332: Strumento di Analisi formantica pronto all'uso	355
Figura 333: Strumento SoundScope®	356
Figura 334: Strumento SoundScope® in operazione	357
Figura 335: Zone di esistenza per la vocale I tonica	358
Figura 336: Esempio di scheda di confronto	359
Figura 337: Esempio di dati acustici disponibili per modelli di refrigeratori d'acqua	363
Figura 338: Esempio di dati di LPS per una CTA	363
Figura 339: Mappa acustica per un refrigeratore d'acqua	364
Figura 340: Distribuzione del LPS attorno ad un refrigeratore d'acqua	365
Figura 341: Schema dei punti di rilievo per il calcolo dei livelli di potenza sonora	365
Figura 342: Rappresentazione spaziale della irradiazione di potenza acustica	366
Figura 343: Esempio di tracciamento dello spettro di un rumore sulle curve NR	367

Figura 344: LPS in un punto P interno ad un ambiente chiuso	368
Figura 345: Attenuazione acustica in canali rettangolari coibentati	370
Figura 346: Schema di trasmissione del rumore in un canale	371
Figura 347; Attenuazione acustica nelle diramazioni	374
Figura 348: Attenuazione acustica nei terminali di condotto	375
Figura 349: Geometria di un plenum	375
Figura 350: Riduzione della rumorosità nelle T e diramazioni	377
Figura 351: Attenuazione del suono nei condotti	378
Figura 352: Corretto posizionamento dei silenziatori	379
Figura 353: Punto di inserimento del silenziatore	380

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: Velocità del suono per alcuni mezzi di trasmissione	4
Tabella 2: Livello di potenza sonora media di varie sorgenti.	8
Tabella 3: Corrispondenza fra numero di punti e righe di frequenza	23
Tabella 4: Corrispondenza fra la larghezza della finestra e l'ampiezza del filtro	24
Tabella 5: Scala di valori delle pressioni sonore e dei livelli di pressione sonora	34
Tabella 6: Attenuazioni dei filtri di pesatura A	45
Tabella 7: Brani musicali analizzati da Y. Ando	49
Tabella 8: Frequenze critiche per alcuni materiali	55
Tabella 9: Potere fonoisolante di alcuni materiali	56
Tabella 10: Potere fonoisolante di alcuni materiali	57
Tabella 11: : Potere fonoisolante di alcuni materiali	57
Tabella 12: Potere fonoisolante di alcuni materiali	58
Tabella 13: Danni provocati dal rumore nei vari apparati	80
Tabella 14: Tabella di Cosa – Vicoli sulla lesività del rumore	81
Tabella 15: Adempimenti per l'applicazione del D.Lgs 277/91	101
Tabella 16: Valori medi di protezione standard per cuffie ed inserti	106
Tabella 17: Valori degli spettri e della rumorosità globale per alcune macchine operatrici	110
Tabella 18: Valori di riferimento NC ed NR	129
Tabella 19: Applicazione del metodo ISO R 1996	130
Tabella 20: Tabella A del DPCM 14/11/97	132
Tabella 21: Tabelle B, C, D del DPCM 14/11/97	133
Tabella 22: Tabella dei valori assoluti di emissione ed immissione per Catania	133
Tabella 23: Nomenclatura del DPCM 5.12.97	137
Tabella 24: Classificazione degli edifici secondo DPCM 5.12.97	137
Tabella 25: Valori limite degli indici acustici caratteristici secondo DPCM 5.12.97	137
Tabella 26: : Correzione dei livelli in funzione del rumore di fondo	156
Tabella 27: Comparazione dei limiti di legge per il rumore prodotto dagli impianti tecnologici	162
Tabella 28: Classi Acustiche indicate dalla UNI 11367:2010	163
Tabella 29: Valori di Kij	172
Tabella 30: Attenuazione di alcuni rivestimenti per solai	174
Tabella 31: Potenze acustiche delle componenti di un autoveicolo	180
Tabella 32: dimensioni delle matrici impiegate in fase di learning e di test per ciascuno dei modelli considerati.	198
Tabella 33: dimensioni delle matrici impiegate in fase di learning e di test per ciascuno dei modelli considerati.	198
<i>Tabella 34: valori dello msa in fase di test e di apprendimento per le reti con la migliore configurazione per i 3 modelli.</i>	202
Tabella 35- Confronto tra i valori di $L_{eq}$ misurati e quelli simulati da Mithra nelle stazioni di rilevamento individuate nell'area pilota della città di Catania.	207
Tabella 36: Fattori di Neper per metro per l'aria secondo UNI EN 12354:6	246
Tabella 37: Fattori di Sabine per alcuni materiali secondo UNI EN 12345:6	246
Tabella 38: Fattori di assorbimento di alcuni oggetti secondo la UNI EN 12354:6	247

Tabella 39: Fattori di assorbimento di file di sedie secondo la UNI EN 12354:6	247
Tabella 40: Fattori di assorbimento di alcuni materiali	248
Tabella 41: Valori di assorbimento di alcuni materiali	249
Tabella 42: Fattori di assorbimento sperimentali di alcuni materiali	251
Tabella 43: Definizione dei descrittori acustici oggettivi utilizzati nelle comparazioni	260
Tabella 44: Alcuni valori di C80 di sale musicali reali	262
Tabella 45: Relazione fra STI e EWI	330
Tabella 46: Corrispondenza fra STI e %Alcons	330
Tabella 47: Fattori di peso per il metodo STI	332
Tabella 48: Valori delle curve NC	336
Tabella 49: Fattori correttivi per la voce umana	338
Tabella 50: Rapporto fra le riflessioni immediate e le distanze limiti	339
Tabella 51: Valori dei livelli NC	367
Tabella 52: Livelli di sonora specifici per vari tipi di ventilatori	369
Tabella 53: Coefficienti di correzione per il rendimento dei ventilatori	370
Tabella 54: Livelli di rumorosità del ventilatore	370
Tabella 55: Attenuazione acustica in canali rettilinei rigidi	372
Tabella 56: Attenuazione acustica dei raccordi a gomito	373