POLITECNICO DI TORINO

II Facoltà di Architettura

Tesi di Laurea

L’acustica delle mense scolastiche

Relatori:
prof. Chiara Aghemo
arch. Arianna Astolfi

Candidata:
Chiara Viazzo

Settembre 2005

INDICE

Introduzione I

CAPITOLO 1

L'ARCHITETTURA DELLE MENSE SCOLASTICHE

1.1 Caratteri morfologici e funzionali delle scuole 1

1.2 La progettazione delle mense 3

1.3 Bibliografia 12

CAPITOLO 2

L'ACUSTICA NEGLI EDIFICI SCOLASTICI

2.1 Disturbo da rumore 14

2.1.1 Ripercussione del rumore sui risultati scolastici dei bambini 16

2.1.2 Ripercussione del rumore sugli insegnati 19

2.2 Rischio di danno uditivo negli ambienti di lavoro 19

2.2.1 Misurare il rumore: il livello sonoro continuo equivalente 19

2.2.2 Il livello di esposizione personale: la normativa vigente 21

2.3 Il comfort acustico nelle mense: compromesso tra intelligibilità e privacy 23

2.4 Bibliografia 26

CAPITOLO 3

INTELLIGIBILITA' DEL PARLATO

3.1 Il comfort acustico 27

3.2 Assenza di disturbo 27

3.3 Buona ricezione 28

3.4 Intelligibilità della parola 30

3.4.1 Misure basate sul rapporto segnale rumore 31

3.4.2 La misura dello STI 36

3.4.2.1 Modulation Transfer Function 39

3.4.2.2 La risposta all'impulso 40

3.5 Bibliografia 46

CAPITOLO 4

I CASI STUDIO

4.1 I casi studio 47

Scuola elementare “Solaro” 47

Scuola elementare “Pianea” 51

Scuola elementare “Collegio San Giuseppe” 53

CAPITOLO 5

INDAGINI IN CAMPO

5.1 Indagini oggettive 57

5.1.1 Misure del tempo di riverberazione 59

5.1.2 Misure del rumore di fondo 66

5.1.3 Il calcolo del L_{ep} 68

5.2 Indagini soggettive 70

5.2.1 Il questionario 70

5.2.2 Risultati delle indagini soggettive 83

5.2.3 Conclusioni 86

5.3 Bibliografia 88

CAPITOLO 6

LA VALUTAZIONE DELL’INTELLIGIBILITA’

6.1 Il calcolo dello STI 90

6.2 Hypercomfort 102

6.2.1 Conclusioni 108

6.3 Bibliografia 109

CAPITOLO 7

LA SIMULAZIONE ACUSTICA

7.1 Acustica geometrica e modelli numerici 111

7.1.1 Metodi delle sorgenti virtuali 112

7.1.2 Metodo del ray tracing 114

7.1.3 I metodi ibridi 116

7.2 Metodologia di simulazione con Odeon 117

7.2.1 Prime riflessioni 118

7.2.2 Late reflection 118
7.3 Procedura di modellazione acustica con Odeon 119
7.3.1 Modellazione 3D 119
7.3.2 Assegnazione dei coefficienti di assorbimento 120
7.3.3 Sorgenti e ricevitori 121
7.3.4 Griglia 122
7.3.5 Parametri di calcolo 123
7.4 Bibliografia 127

CAPITOLO 8
PROGETTAZIONE E SIMULAZIONE
8.1 Il caso studio 128
8.1.1 La taratura del modello 128
8.1.2 La ricerca della densità ottimale 130
8.2 Il progetto 134
8.2.1 Le simulazioni 137
8.3 Conclusioni 144
8.4 Bibliografia 146

CONCLUSIONI 147

APPENDICE 1
FONDAMENTI DI ACUSTICA
1.1 La descrizione del suono 148
1.2 Grandezze fondamentali e loro unità di misura 149
1.3 Livelli sonori 151
1.4 Lo spettro sonoro 153
1.5 Sensazione sonora e livello di sensazione 156
1.6 Curve di ponderazione 157
1.7 La propagazione del suono in diverse condizioni di campo acustico 158
1.7.1 La propagazione in campo libero 158
1.7.2 La propagazione negli ambienti chiusi 159
1.8 Bibliografia 163

INTRODUZIONE

La qualità degli ambienti scolastici e le conseguenze di benessere degli studenti e degli insegnanti sono spesso l'aspetto più trascurato nella progettazione e nella realizzazione di tali edifici. A tutt'oggi il D.M. 18/12/75, che costituisce la norma di riferimento in materia, fatica ancora a trovare una effettiva applicazione.

I bambini passano buona parte del loro tempo a scuola dove ascoltano le lezioni, studiano, giocano e spesso, anche quotidianamente, si fermano a mangiare. La loro giornata è piena di attività ed è faticosa e la qualità dell'ambiente in cui trascorrono il tempo influisce pesantemente sulla stanchezza psicofisica che si accumula durante il passare delle ore. Anche il rendimento scolastico e il tempo di concentrazione sono condizionati da una serie di fattori tra cui assume una grande importanza l'ambiente sonoro.

Uno dei fenomeni più gravi associati al rumore consiste nella perturbazione dell'intelligibilità del parlato che comporta significative ripercussioni sulla formazione degli allievi, soprattutto quelli più giovani e in fase di apprendimento. Infatti i soggetti più piccoli come quelli della scuola primaria trovandosi in un momento fondamentale per lo sviluppo intellettuale, risentono notevolmente di un ambiente acustico inadeguato poiché la mancanza di conoscenza non permette loro di ricostruire correttamente le parti del messaggio verbale mascherate dal rumore, con ovvie conseguenze sullo sviluppo del linguaggio. Quindi, quando si parla di scuola, è corretto affermare che il comfort acustico dei vari ambienti del complesso assume una funzione educativa oltre che una grande importanza dal punto di vista della salute.

Non esistono solo le lezioni di italiano o di matematica; anche i momenti di ricreazione sono importanti: la pausa pranzo è uno dei momenti più delicati perché i bambini tendono a dare sfogo a tutta la loro esuberanza e il livello del rumore raggiunge soglie molto elevate. A tale proposito recenti studi hanno messo in risalto l'incidenza del fattore rumore sulle mense scolastiche: in generale hanno evidenziato un ritardo dell'apprendimento della lettura ed errori di disattenzione più frequenti negli allievi che pranzano a scuola. Per questo è fondamentale che l'ambiente del refettorio sia attrezzato per contenere gli inevitabili rumori di fondo e per consentire che si parli a tavola senza urlare, situazione diseducativa oltre che fonte di stress.

Dopo aver realizzato una serie di misure all'interno di tre mense per caratterizzare il loro ambiente acustico, il lavoro si è incentrato sullo studio dell'intelligibilità della parola: infatti per tutte le sale è stato calcolato l'indice di intelligibilità STI (Speech Transmission Index).

Sulla base dei risultati, per un solo caso studio è stato verificato un progetto di riqualifica acustica tramite l'uso di un software di simulazione. L'uso di questi programmi di calcolo permette in sede di progettazione di controllare la validità di diverse soluzioni ideate e le possibilità offerte da questi sono indispensabili per chi voglia affrontare un progetto di riqualificazione acustica.

CAPITOLO 1

L'ARCHITETTURA DELLE MENSE SCOLASTICHE

1.1 Caratteri morfologici e funzionali delle scuole

Oggi le strutture scolastiche hanno abbandonato tutte quelle rigide impostazioni dello spazio che caratterizzavano la tipica inflessibilità didattica di una volta. Si affermano ormai nuove impostazioni didattiche basate su una pluralità di attività culturali e ricreative che richiedono una definizione degli spazi caratterizzati da un massimo della flessibilità.

In base a questa riflessione si intuisce come il rapporto tra la didattica e l'architettura degli spazi sia particolarmente stretto e si sottolinea come oggi gli organismi scolastici richiedano degli spazi di diversa dimensione capaci di accogliere gruppi anche di notevoli dimensioni e caratterizzati in modo differente in base all'attività che si andrà a svolgere: in linea generale uno spazio correttamente progettato può aiutare i bambini nel loro processo di apprendimento e può essere un valido sostegno alle attività didattiche proposte dagli insegnanti. Infatti sembra che la ricerca di spazialità, della relazione con il contesto, dell'atmosfera interna, dell'attenzione per il dettaglio architettonico in genere, siano dei fattori che entrano a far parte del processo legato all'apprendimento degli studenti, che trascorrendo la maggior parte del loro tempo in un ambiente piacevole, ne possono essere positivamente influenzati anche da un punto di vista didattico.

Secondo il D.M. 18 dicembre 1975, ("*Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici minimi di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica ad osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica*"), i modelli di strutturazione didattica più in uso in Italia determinano l'individuazione nelle strutture scolastiche di dieci nuclei funzionali fondamentali:

- ✓ spazi riservati all'unità pedagogica per lo svolgimento delle materie in programma (o classi, così come definite dalla legislazione vigente);
- ✓ spazi riservati all'insegnamento specializzato, come per esempio le attività artistiche, tecniche e scientifiche (ad esclusione delle scuole secondarie di primo e secondo grado);

- ✓ spazi riservati a laboratori e officine (solo ad uso delle scuole secondarie superiori);
- ✓ spazi riservati alla comunicazione e all'informazione, cioè a tutte quelle attività parascolastiche integrative come, per esempio, auditori e biblioteche che possono essere integrabili fisicamente con l'intero complesso scolastico;
- ✓ spazi per l'educazione fisica ed il servizio sanitario, divisi in palestre, aree di gioco all'aperto e per le visite mediche;
- ✓ spazi riservati alla mensa, di dimensioni in funzione del numero dei commensali e comunque non superiori a 375 m^2;
- ✓ spazi riservati all'amministrazione, ubicati possibilmente al piano terra;
- ✓ spazi per l'assistenza, fruibili anche per attività gestionali e di segreteria;
- ✓ spazi riservati alla distribuzione;
- ✓ spazi per i servizi igienico - sanitari e per gli spogliatoi.

Ai fini di realizzare questi spazi nel modo migliore possibile, in fase di progettazione è fondamentale prevedere delle soluzioni finalizzate a rendere ottimale il *comfort ambientale* di ogni singolo nucleo funzionale di questo complesso organismo scolastico.

A tale proposito la disposizione delle aperture dovrà essere tale da garantire prestazioni ottimali di illuminazione e di ventilazione; si dovrà prestare attenzione che ci sia un'adeguata illuminazione di banchi e lavagna senza particolari riflessi.

Da un punto di vista acustico si dovrà provvedere ad una corretta progettazione degli ambienti per migliorare le condizioni di apprendimento dei bambini ed evitare fastidiosi disturbi da rumore tipici di scuole che si affacciano su strade molto trafficate.

Tutti gli spazi comuni, cioè utilizzati per le attività particolari non legate all'insegnamento, come ad esempio la mensa, sono ambienti da tenere in considerazione nel progetto acustico, non solo per il disturbo che possono arrecare ad altre attività, ma anche per il clima acustico che in essi si viene a creare, con i livelli sonori molto elevati per il gran numero di utenti presenti contemporaneamente. In queste situazioni si deve agire cercando di ridurre il più possibile il livello sonoro interno, in modo tale che gli studenti, percependo di meno il rumore, parleranno a voce più bassa.

1.2 La progettazione delle mense

Le mense sono definite semplicemente come strutture che distribuiscono cibi direttamente preparati in ambienti di cucina annessi o provenienti da centri produttivi di tipo industriale (precotti e simili) a consumatori operanti in comunità, aziende o luoghi di studio e di lavoro in genere, dei quali la mensa costituisce servizio. In linea di massima sono caratterizzate da una offerta di tipo generale, a ridotta ampiezza gastronomica, di solito ripetuta periodicamente nel tempo e dalla tipica consumazione ai tavoli articolati per posti non assistiti o parzialmente assistiti.

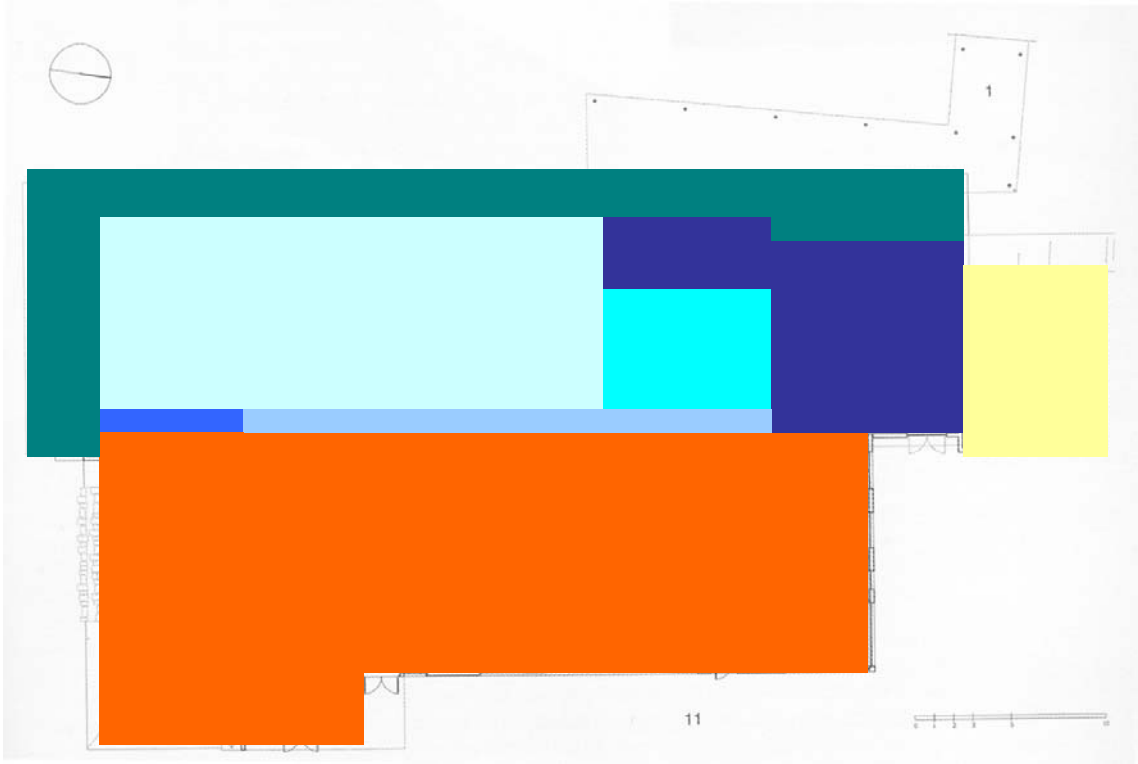
Secondo il D.M. 18 dicembre 1975, che costituisce la norma di riferimento sull' edilizia scolastica, la mensa dovrà svolgersi in uno spazio dimensionato in funzione del numero dei commensali (0.70 m^2/alunno), calcolato tenendo presente che i pasti potranno essere consumati in più turni, convenientemente compresi nel tempo disponibile e che la sua dimensione, compresi i relativi servizi, non dovrà superare i 375 m^2. È possibile, considerando l'eventuale concentramento di più scuole, prevedere un unico servizio di mensa; in questo caso la superficie afferente viene dedotta dal globale delle singole scuole. Inoltre lo spazio della mensa potrà anche non costituire un ambiente isolato ed in questo caso la superficie, con le relative funzioni, verrà ridistribuita all'interno dell'organizzazione degli spazi didattici con un criterio di polifunzionalità.

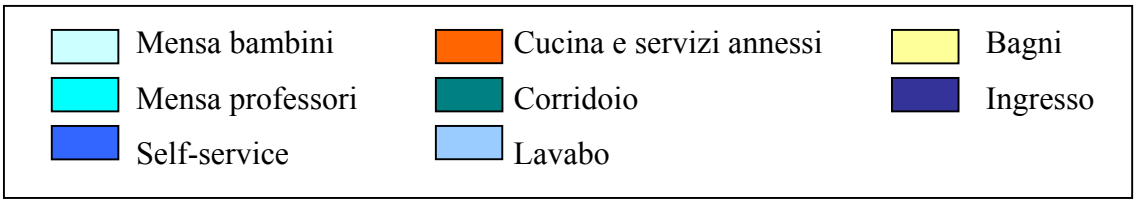
Secondo normativa, al servizio dello spazio per la mensa si deve prevedere:

- ✓ Un locale cucina di dimensioni e forma tale da permettere lo svolgimento in modo razionale delle funzioni cui è destinata (preparazione, cottura, ecc.) e di poter accogliere le attrezzature necessarie;
- ✓ Una dispensa per la conservazione delle derrate anche in frigo, possibilmente con accesso proprio dall'interno;
- ✓ Un'anticucina e un locale per lavaggio stoviglie;
- ✓ Uno spogliatoio, doccia e servizi igienici per il personale addetto, separati con idonei disimpegni dai locali precedenti;
- ✓ Uno spazio per la pulizia degli allievi, corredato di lavabi.

Data la natura dei locali è richiesta una particolare cura nella scelta dei materiali e degli impianti tecnologici atti a garantire, in stretta relazione con i requisiti dell'igiene, l'osservanza delle norme relative alle condizioni di abitabilità.

A tale proposito la mensa della scuola Gustave Doré di Hoechfelden, vicino a Strasburgo è un esempio di corretta progettazione di spazi per la ristorazione in ambito scolastico: il progetto distingue chiaramente, attraverso l'organizzazione spaziale e la scelta dei materiali, la parte riservata al servizio e la parte pubblica costituita dell'atrio a sala da pranzo per studenti e per insegnati. L'atrio comunica a nord con i bagni degli studenti. Il self-service confina con la sala da pranzo degli insegnanti. La grande sala da pranzo (300 m^2) può contenere fino a 270 persone. La cucina si sviluppa lungo l'asse nord-sud e si apre a est su una corte di servizio.





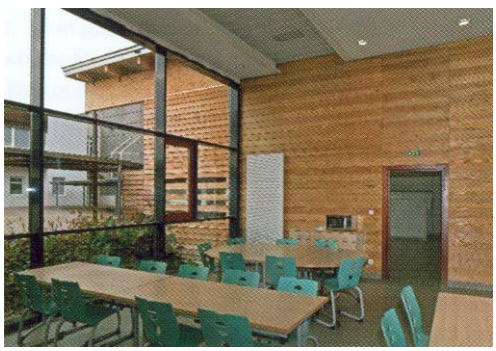


Fig. 1.1 - *Planimetria, vista della zona lavabo e della mensa professori- Scuola Gustave Doré*

Fig. 1.2 - *Mensa per studenti - Scuola Gustave Doré*

Un ulteriore esempio per una corretta progettazione per gli spazi di ricreazione all'interno di complessi scolastici, è la mensa realizzata per il Lycee Francois Closet a Tours. In questo caso la mensa è stata realizzata con l'idea di creare un luogo decisamente accogliente, soprattutto grazie alle grosse finestre che si aprono sul parco ed inoltre il rivestimento in legno delle superfici interne, della volta, delle pareti e del pavimento, rendono l'ambiente confortevole anche da un punto di vista della resa acustica.

Fig. 1.3 - *Mensa del Lycee Francois Closet a Tours*

Realizzate sempre con attenzione al benessere ambientale sono le mense di alcune scuole elementari dell'interland milanese. Pur nella semplicità dell'architettura, che rispecchia chiaramente la tipologia edilizia scolastica italiana come chiari esempi di strutture ormai datate, in queste sale si è cercato di creare un ambiente adatto ai bambini. In questi casi, con l'impiego di materiali appropriati, l'intervento di correzione acustica si è verificato un'occasione per rendere complessivamente più salubre gli ambienti scolastici nonché migliorarne anche l'aspetto estetico.

La scelta accurata dei materiali rappresenta un punto fondamentale nella fase di progetto, soprattutto perché si tratta di ambienti in cui si deve garantire la salubrità sotto tutti gli aspetti. Per esempio in casi di questo tipo va escluso l'uso di materassini di fibra minerale o sintetica: questi hanno elevate caratteristiche di igroscopicità e quindi l'assorbimento di vapori deprime le caratteristiche acustiche del pannello e con il tempo ne accelera anche il deperimento. Inoltre questi pannelli con l'inevitabile deperimento rilasciano nell'aria fibre sottilissime che rendono insalubre l'ambiente. Vanno quindi evitati tutti quei materiali che si degradano in tempi piuttosto brevi e che sono altamente ricettivi di umidità e di polveri.

Nelle mense di Cologno Monzese e Lesmo Milanese la scelta dei materiali è stata accurata: infatti sono stati utilizzati dei pannelli di sughero che oltre a promettere buone prestazioni fonoassorbenti hanno permesso la scelta di soluzioni cromatiche che garantiscono ottimale comfort sia ambientale che psico-visivo.

Fig. 1.4 - *Mense delle scuole di Cologno Mozese, a destra, e Lesmo Milanese, a sinistra*

Nella fase di progettazione è fondamentale poi ricordare che l'igiene è alla base di una buona ristorazione: realizzare una cucina collettiva significa minimizzare il numero degli angoli, giunti e altre trappole antigieniche, in più questi ambienti esigono muri e pavimentazioni lavabili con getto d'acqua. Nell'organizzazione interna della cucina poi è importante che i locali siano organizzati in modo da far progredire gli alimenti dalle zone di ricezione delle merci fino al luogo di consumazione ai tavoli evitando qualunque percorso che possa determinare una contaminazione sporco-pulito. A questo proposito è importante una corretta progettazione delle cucine che dovranno essere studiate in base al corretto susseguirsi di operazioni di preparazione dei pasti.

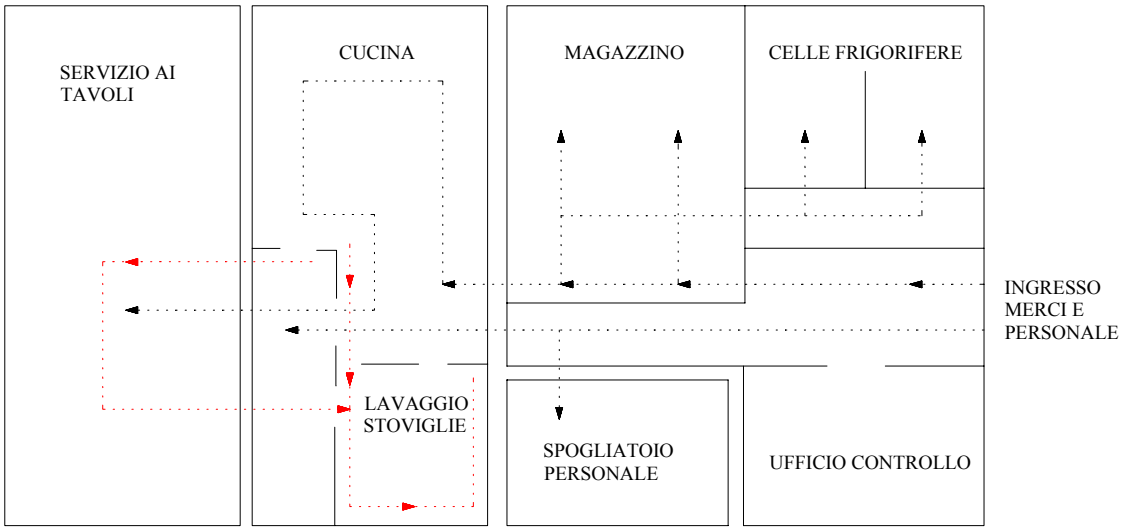
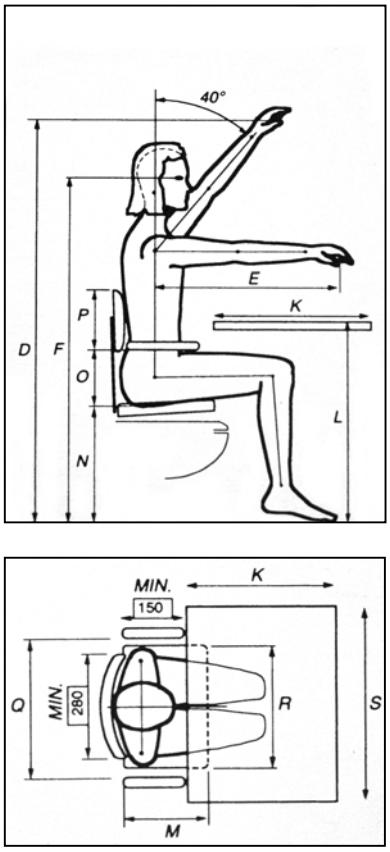


Fig. 1.5 - *Schema di distribuzione delle attività e delle relazioni funzionali di un ambiente per la ristorazione*

Altro fattore importante da prendere in considerazione è la corretta interrelazione fra le dimensioni dell'uomo (nella fattispecie dei bambini) e gli spazi relativi alle zone di consumazione dei pasti. Nella pratica progettuale infatti il ricorso all'utilizzazione diretta dei dati antropometrici viene effettuato sempre più di frequente, soprattutto con l'affermarsi della metodologia progettuale fondata sull'analisi puntuale delle esigenze dei fruitori e sulla corrispondente risposta in termini di prestazione dei materiali, dei processi, dei prodotti finali. Questo approccio prevede una verifica scrupolosa delle condizioni di fruibilità degli spazi che trova riferimento progettuale e verifica nella conoscenza dettagliata dei dati antropometrici (per esempio le misure di ingombro, di accesso e di movimento).



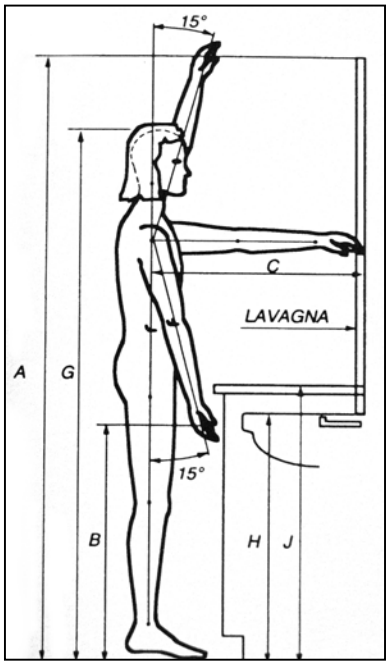


Fig. 1.6 - *Dimensionamento degli arredi per bambini da 5 a 15 anni*

1	A	B	C	D	E	F
	2085	815	735	1440	660	1215
15	1915	730	685	1375	610	1160
	1765	665	635	1315	570	1100
	1860	705	665	1320	600	1100
12	1705	630	620	1250	555	1040
	1545	560	565	1185	510	990
	1645	605	600	1175	540	975
9	1510	555	550	1120	495	925
	1345	510	485	1040	435	880
	1505	545	550	1080	500	890
7	1370	510	495	1015	445	850
	1245	485	445	960	395	815
	1330	500	480	970	430	815
5	1210	465	435	915	385	770
	1085	425	390	865	345	720

Tab. 1.1 - *Dimensionamento degli arredi per bambini da 5 a 15 anni riportati in millimetri*

Età	G	H	J	K	L	M
15	1675	760	915	460	650	370
12	1485	685	795	420	590	340
9	1320	635	695	380	525	300
7	1220	585	635	355	480	275
5	1090	485	570	330	445	250

Età	N	O	P	Q	R	S
15	405	150	175	445	380	760
12	370	145	160	420	370	710
9	325	135	140	355	330	610
7	290	130	130	330	305	610
5	265	120	125	305	280	535

Tab. 1.2 – *Dimensionamento arredi per bambini da 5 a 15 anni riportati in millimetri*

Nelle figure che ho inserito, ad ognuno dei valori corrisponde un gruppo di tre misure date in millimetri: la misura superiore si riferisce a persone valutate statisticamente di alta statura, la misura di mezzo si riferisce a persone di statura media mentre la misura inferiore si riferisce a persone valutate statisticamente di bassa statura.

Queste indicazioni sono fondamentali per la progettazione degli spazi della mensa perché lo spazio necessario per il posto a sedere deve essere determinato partendo dalle dimensioni umane consentendo di inserire tavoli e sedie correttamente proporzionati e permettono una valutazione più attenta nella disposizione dei tavoli all'interno della sala.

In alcune soluzioni distributive, le sedie di due tavoli adiacenti possono essere posizionate una di spalle all'altra. La misura utile dello spazio da lasciare libero fra di esse è prevista in funzione dell'accesso delle sedie: dai manuali di progettazione architettonica si evince che a questo scopo risulta corretta una distanza minima tra le

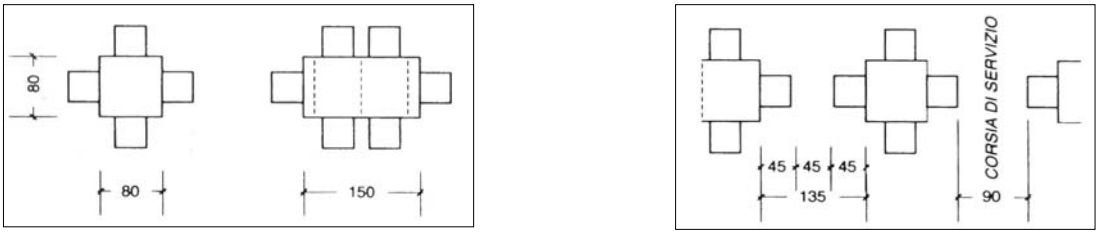


Fig. 1.7 - *Ingombri di tavoli con commensali disposti sui quattro lati e distacchi funzionali minimi*

sedie di 45 cm, oppure una distanza ai tavoli di 135-140 cm. In ogni caso è preferibile prevedere una la distanza di circa 170 cm. La misura minima raccomandata per la corsia di servizio è di 90 cm come è illustrato nei disegni in figura 1.7 e vale anche per la sistemazione dei tavoli in posizione obliqua.

Oltre la distanza tra un tavolo e l'altro è importante parlare della densità d'occupazione della sala da pranzo e per la sua determinazione gioca un ruolo fondamentale la disposizione planimetrica dei tavoli.

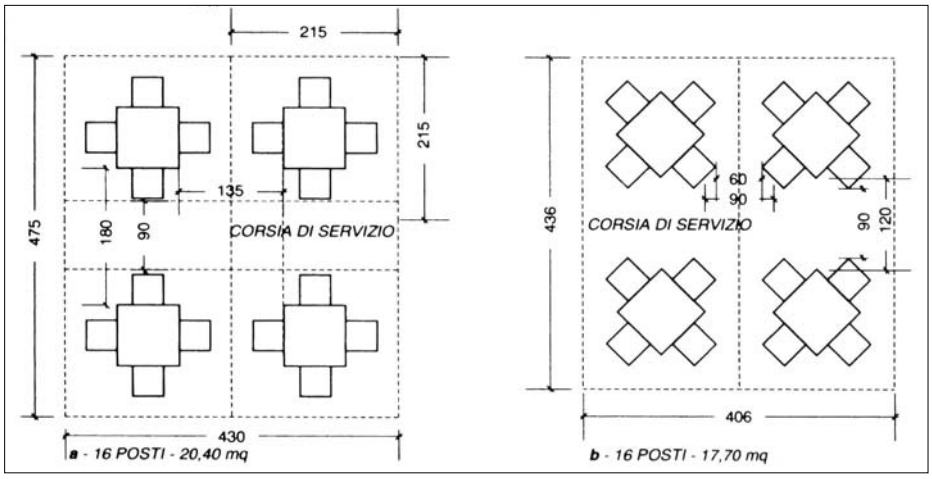


Fig. 1.8 - *Ingombri minimi delle disposizioni in parallelo e in diagonale*

Si può passare da una densità locale di 1.4 m^2 / persona nel caso di tavoli quadrati con configurazione quadrata (figura x a sinistra), ad una densità di 0.92 m^2/persona per la configurazione in diagonale. La densità di occupazione è un dato fondamentale nella progettazione di una mensa perché oltre a dover rientrare entro determinati standard legislativi, rappresenta un dato da controllare per ottenere buoni risultati acustici.

Anche in riferimento agli aspetti relativi alla circolazione pedonale, il corpo umano deve essere assunto come unità base di misura. In genere, soprattutto nel caso delle mense come quelle oggetto di studio, non è possibile avere più corsie di circolazione e di conseguenza sia i camerieri che gli studenti dovranno utilizzare i medesimi percorsi, stando attenti a non darsi reciprocamente fastidio.

Le dimensioni per una sola corsia utilizzata unicamente per il servizio, che si dovrebbe sviluppare tra due file di tavoli, è influenzata da diversi fattori che concorrono alla definizione delle relative misure utili, compreso l'ingombro determinato dallo spostamento delle sedie. Ma se si dovessero tenere in considerazione tutti gli spostamenti possibili dei commensali durante un pranzo e tutte le situazioni elencate fino ad ora, la misura utile dello spazio da lasciare libero fra le sedie, dovrebbe essere

superiore ai 2.50 m che una dimensione non funzionale in un'economia degli spazi. Panero e Zelinik suggeriscono una distanza utile fra i tavoli di 215 cm che rappresenta un compromesso rispetto alle varie esigenze in sala.

Le immagini inserite riguardano proprio gli standard minimi necessari per una adeguata circolazione fra i tavoli e comprende sia la zona di servizio che quella di circolazione riservata ai commensali (J. Panero, M. Zelinik, 1983)

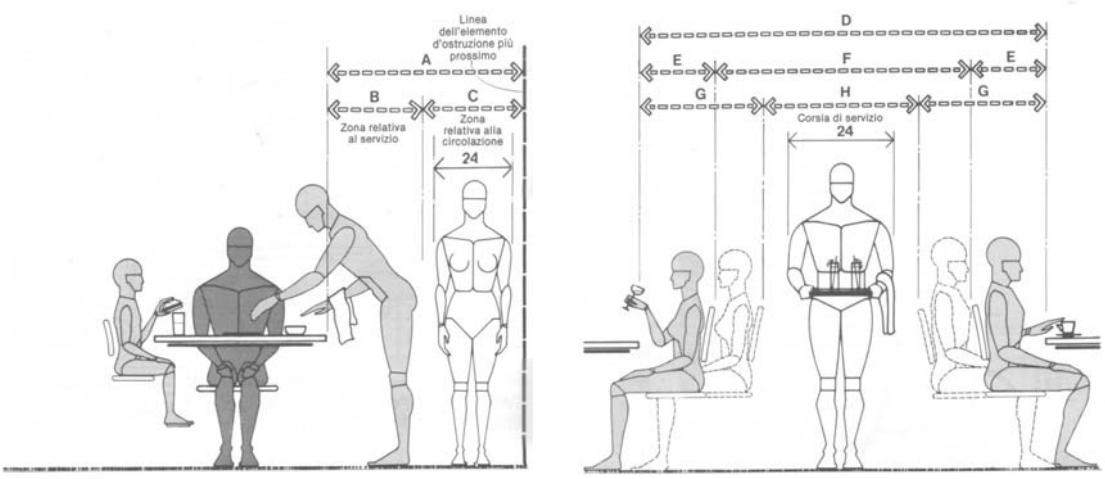


Fig. 1.9 - *Dimensioni della zona relativa alla circolazione*

Le dimensioni in figura sono riportate in centimetri nella seguente tabella:

A	121,9
B	45,7
C	76,2
D	243,8 - 274,3
E	45,7 - 61,0
F	152,4
G	76,2 - 91,4
H	91,4

Tab. 1.3 - *Misure utili per la zona relativa al servizio di circolazione*

1.3 Bibliografia

1. Decreto Ministeriale 18/12/1975, *Norme tecniche relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici minimi di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica*.
2. AA.VV., *Il nuovo manuale dell'architetto*, Roma, Mancuso Editore, 1996
3. AA.VV., Manuale di progettazione edilizia, vol. 1,Milano, Ulrico Hoepli, 1995
4. E. NEUFERT, *Enciclopedia pratica per progettare e costruire*, Milano, Ulrico Hoepli, 1988
5. J. PANERO, M. ZELINIK, *Spazi a misura d'uomo*, Milano, BE-MA, 1983
6. P. COSULICH, A.ORNATI, *Progettare senza barriere*, Milano, Pirola editore, 1980

Normativa

7. D.M. 18 dicembre 1975 - *"Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici minimi di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica ad osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica"*

Articoli

8. A. ASTOLFI, V. CORRADO, M.FILIPPI, S. VIAZZO, *Classroom Acoustic Assessment: Analysis of Subjective Answers and Measured Indices*, Euronoise Naples 2003
9. *Quiet Areas in restaurants*, Final Report to U.S. Architectural and Transportation Barriers Compliance Board, under contract No. QA92004001, December 1993
10. A.ASTOLFI, M. FILIPPI*, Good Acoustical Quality in Restaurants: a Compromise Between Speech Intelligibility and Privacy,* International Conference on Acoustics - ICA 2004, Kyoto 4 - 9 aprile 2004

Tesi di laurea

11. A. MACHIOLE', *L'acustica dei locali per la ristorazione*, Politecnico di Torino, Facoltà di architettura, relatore: prof. Marco Filippi, A.A. 2001-20002
12. C. GULINO, *L'acustica nelle aule scolastiche*, Politecnico di Torino, Facoltà di Architettura, relatori: prof. Marco Filippi, arch. Arianna Astolfi, A.A. 2001- 2002

Riviste

13. L'architettura naturale, "A*rchitettura sostenibile per la scuola"*, n°25, pp. 22-27, anno VII, Dicembre 2002
14. l'Arca, n°154, pp. 4-13, Dicembre 2000
15. Architectural review, vol. 194, n°1196, pp. 56-58, Aprile 1994

Siti internet

16. www.bioediliziaonline.it
17. www.coverd.it
18. www.spectra.it

CAPITOLO 2

L'ACUSTICA NEGLI EDIFICI SCOLASTICI

Nell'immaginario collettivo la parola mensa evoca un ambiente significativo per diversi aspetti: la mensa è sinonimo di pausa salutare rispetto alle fatiche e agli impegni della giornata lavorativa, di spazio aggregativo, che concilia il dialogo e la comunicazione tra colleghi. Nelle scuole, questo spazio deve poter consentire agli alunni di recuperare le energia impiegate durante la mattina, per far ritorno poi in aula nelle condizioni migliori per riprendere le lezioni. Ma una buona mensa deve essere accogliente e confortevole da un punto di vista acustico, capace di contrastare l'eccessiva rumorosità che renderebbe difficile ogni tentativo di comunicazione e provocherebbe danni effettivamente negativi sull'organismo (difficoltà di concentrazione, irritabilità, agitazione) destinati a ridurre il rendimento degli utenti alla ripresa dell'attività.

Inoltre molto spesso gli edifici scolastici, soprattutto quelli in aree fortemente urbanizzate, sono esposti ad elevati livelli di rumore ambientale, ma sono soprattutto i livelli del rumore nelle aule o negli ambienti utilizzati dai bambini (come i casi studio di questo lavoro) a creare diversi problemi.

Diventa allora essenziale realizzare un progetto acustico per i vari ambienti delle scuole al fine di ridurre al minimo gli effetti dannosi del rumore, della riverberazione e della inadeguata intelligibilità della parola.

2.1 Disturbo da rumore

L'OMS (Organizzazione Mondiale della Sanità) definisce la salute come "uno stato di completo benessere fisico, psichico e sociale", non riferendosi solo all'assenza di malattia e di infermità. La tutela della salute deve preveder quindi il mantenimento di uno stato di benessere prima ancora che si verifichino i sintomi di una malattia oggettivamente rilevabile.

Il disturbo da rumore viene normalmente considerato tra i fattori che pregiudicano maggiormente il livello di qualità della vita; infatti, nonostante il danno uditivo sia la conseguenza più grave dell'esposizione al rumore, questa può alterare il senso di benessere dell'uomo. Non a caso la definizione di rumore come "suono indesiderato" è espresso in termini psicologici più che fisici.

La reazione al rumore è legata soprattutto alle caratteristiche fisiche del suono (per esempio l'intensità del suono), alla durata di esposizione al fenomeno sonoro e in parte alla valutazione che si dà al suono percepito. Infatti a stimoli identici la sensazione di fastidio risulta piuttosto variabile: fenomeno che viene spiegato a partire da condizioni personali come la sensibilità individuale al rumore, il tipo di attività svolta in quel momento e dalle strategia messe in atto per sopportarlo o evitarlo.

I danni che un rumore può causare all'organismo possono essere immediatamente collegati all'organo uditivo e possono portare alla perdita momentanea o permanente dell'udito oppure ad una più semplice difficoltà di percezione del parlato, oppure possono interessare una sfera più ampia dell'organismo umano toccando per esempio la pressione sanguigna o producendo sintomi psicosomatici, disturbi comportamentali e attitudinali.

Caratteristiche come l'intensità, imprevedibilità e l'incontrollabilità del rumore, soprattutto se protratti nel tempo, interferiscono con l'attività mentale: si parla, per esempio, di concentrazione e attenzione, di comprensione verbale o abilità a trattare problemi complessi, tutte situazioni che possono avere conseguenze significative soprattutto su bambini in età scolare.

Cambiamenti repentini di intensità del rumore possono portare ad una immediata reazione fisica, per esempio possiamo fare un sobbalzo o avere una contrazione muscolare, ma se poi lo stimolo risulta irrilevante, continuo e non troppo forte, può subentrare rapidamente uno stato di assuefazione, nel senso che non ci si lascia più distrarre dal fenomeno sonoro. Un rumore continuo, elevato e ad alta frequenza (oppure variabile e imprevedibile) agisce invece come un ulteriore carico mentale rendendo difficile la concentrazione e lo svolgimento della propria attività. Generalmente sono prese in causa tutte quelle attività dove è richiesta una costante elaborazione di informazioni: il rumore può per esempio mascherare parole e suoni fondamentali per lo svolgimento delle attività in corso, soprattutto può interferire con il linguaggio interiore che altro non è che il pensiero che accompagna le varie attività; può interferire con la memoria a breve termine o memoria di lavoro; può creare condizioni in cui si allentano tutti quei meccanismi di controllo che portano a ridurre la quantità e la qualità di prestazione portando ad esempio ad aumentare il numero degli errori; il rumore se continuo può inoltre portare un forte affaticamento, irritabilità con conseguente perdita di concentrazione e infine alterazione della qualità del sonno.

Facendo riferimento alle strutture scolastiche, il maggior responsabile del rumore prodotto all'esterno dell'edificio, è sicuramente individuabile nel traffico stradale e, per quei complessi situati in aree particolarmente trafficate, il problema si fa decisamente più grande: infatti il rumore prodotto all'esterno può essere facilmente trasmesso all'interno propagandosi attraverso i muri perimetrali dell'edificio.

Tuttavia, come già accennato, il rumore a cui i bambini sono sottoposti all'interno di una scuola, è una combinazione di rumore esterno e di rumore generato internamente. Infatti capita piuttosto spesso che la fonte predominante del rumore siano gli stessi bambini, con livelli sonori determinati dall'attività svolta in quel momento.

In generale gli effetti del rumore e delle inappropriate condizioni acustiche rientrano nelle seguenti categorie:

a) disturbi causati a bambini e insegnanti
b) ripercussioni sui risultati scolastici
c) problemi di intelligibilità del parlato
d) ripercussioni sulla salute degli insegnanti, in particolare problemi di voce

Riassumerò questi problemi all'interno del successivo paragrafo, riservando poi alcune righe alla salute degli insegnanti.

2.1.1 Ripercussione del rumore sui risultati scolastici dei bambini

A scuola la comunicazione verbale non è solo un mezzo per trasmettere informazioni e garantire continuità di apprendimento ma è anche indispensabile per allacciare rapporti e socializzare: è indispensabile allora che il luogo in cui il bambino trascorre la maggior parte del suo tempo garantisca benessere e comfort acustico.

Gli elementi di disturbo alla comunicazione sono in genere un alto rumore di fondo (prodotto indifferentemente da sorgenti esterne e interne) e la presenza di un ambiente eccessivamente riverberante. Situazioni del genere possono portare ad una maggiore difficoltà di apprendimento individuale; possono compromettere l'intelligibilità della parola; richiedere un impegno di concentrazione superiore anche da parte degli insegnanti, i quali dovranno anche utilizzare un livello di sforzo vocale maggiore; possono ridurre la disciplina delle aule e chiedere uno sforzo molto grande a tutti quegli studenti con particolari problemi legati all'ascolto e all'apprendimento o di non madre lingua.

Sebbene i bambini non manifestino particolari reazioni da disturbo nei confronti del rumore, così come invece accade per gli adulti e a partire nei giovani di età compresa tra

i 16 e i 18 anni, tuttavia non sono immuni dagli effetti del rumore che riguardano oltre che l'apprendimento puramente nozionistico, anche lo sviluppo di certe capacità intellettuali. A tale proposito numerosi studi stimano che un livello sonoro troppo elevato in casa o a scuola possa alterare la qualità delle comunicazioni verbali, generare ritardi nell'acquisizione della lingua, disturbi del linguaggio sia scritto che parlato e una limitazione della ricchezza del vocabolario. Allo stesso modo la mancanza di intelligibilità del parlato, collegata strettamente al rumore, può avere ripercussioni sulla formazione e sullo sviluppo mentale di giovani studenti.

In genere gli studi sull'effetto del rumore sui bambini sono sempre limitati ad un certo periodo di tempo che spesso è piuttosto breve. In questi termini il disturbo da rumore si concentra sulla difficoltà di apprendimento immediata cioè quella che comprende la perdita di significato del contenuto di messaggi verbali, la bassa attenzione degli allievi ovvero il più generale disturbo dell'intelligibilità del parlato. Queste sono osservazioni che permettono di individuare più microeffetti che ripercussioni a lungo termine.

L'esposizione prolungata ad alti livelli di rumore genera indubbiamente effetti duraturi ed è stata per esempio associata ad una scarsa memoria a lungo termine, scarsa comprensione nella lettura ed una diminuzione della motivazione negli scolari. Una prova di ciò è data da uno studio realizzato nel 1975 da Bronzaft e McCarthy i quali hanno scoperto che i bambini situati sul lato più silenzioso di una scuola posta accanto a una ferrovia sopraelevata, avevano risultati migliori nella lettura rispetto ai bambini situati sul lato esposto al rumore del treno, con livelli superiori a 89 dB(A).

Oltre a ricerche condotte sugli effetti provocati dal rumore ambientale esterno oggi si prevedono indagini realizzate anche per verificare gli effetti provocati dal rumore in classe, soprattutto perché si è dimostrato come il rumore interno possa interferire, quanto quello esterno, sulla capacità di lettura, di calcolo e sul rendimento scolastico complessivo dei bambini. Per questo tipo di studio è allora importante ricordare che l'intelligibilità del parlato (definita come percentuale di parole o frasi correttamente comprese da un ascoltatore rispetto alla totalità delle parole o frasi pronunciate da un parlatore), che risulta fondamentale per la qualità di apprendimento degli studenti, dipende da alcune condizioni ambientali, quali il dal tempo di riverberazione e il livello di rumore di fondo presenti in ambiente.

Alcuni studi hanno messo a confronto le prestazioni di bambini, di scuole primarie, che facevano lezione in aule non trattate acusticamente, con quelle di bambini in aule trattate acusticamente e quindi con livelli di rumore di fondo e di tempi di

riverberazione piuttosto ridotti. Gli alunni che hanno ottenuto i risultati migliori dei test di intelligibilità erano quelli che facevano ovviamente lezione in aule trattate.

Ulteriori studi sulla comprensione della parola in differenti condizioni di rumore e riverberazione hanno dimostrato come i bambini più piccoli (tra i 6 e i 10 anni) siano molto più sensibili degli adulti alle cattive condizioni acustiche. È stato inoltre dimostrato che per un bambino la comprensione di un discorso in presenza di rumore ed eccessiva riverberazione non raggiunge quella di un adulto fino agli ultimi anni dell'adolescenza. Prima di allora, più piccolo è il bambino maggiore è l'effetto dannoso del rumore e della riverberazione, soprattutto per bambini al di sotto dei 13 anni, che risultano essere particolarmente sensibili.

Infine del rumore bisogna ancora segnalare altri effetti quali le manifestazioni di irritabilità, aggressività, di fatica e agitazione che possono compromettere il clima di socializzazione all'interno della scuola ed essere causa di conflitti. Gli studiosi ritengono che il rumore che rende complicate le comunicazioni verbali, possa favorire la comparsa di isolamento rendendo sempre più difficile la socializzazione. Il rumore sembra essere un fattore fondamentale di rischio per la salute dei bambini sia sul piano fisiologico che psicologico.

Ciò che colpisce maggiormente di tutti questi ragionamenti è il fatto che gli effetti dovuti ad una esposizione pressoché cronica al rumore sembrano essere effetti a lungo termine; cioè i problemi di apprendimento e comportamento sopra citati non finiscano una volta che il bambino si sottrae alla fonte del disagio. È per questo che ogni parte della scuola deve essere studiata e progettata, anche quegli ambienti come per esempio la mensa, in cui i bambini passano una parte del loro tempo. A maggior ragione poi la mensa è un luogo in cui in genere i bambini non trattengono le urla e si misurano livelli di rumore esagerati che possono aggravare una condizione di benessere già minata dalle ore di lavoro precedenti.

A tal proposito, penso che non ci si debba dimenticare che spesso i bambini dimostrano la loro vitalità attraverso il rumore e che in certe condizioni, come quella della ricreazione, abbiano la necessità di sfogare la loro vivacità attraverso il gioco, cosa che è di sicuro fonte di manifestazioni molto rumorose.

2.1.2 Ripercussione del rumore sugli insegnanti

Oltre ad essere dannosi per i bambini, il rumore e le inappropriate condizioni acustiche degli ambienti scolastici si ripercuotono sul comportamento degli insegnanti, sul loro metodo di insegnamento e anche sulla loro salute.

Elevati livelli di rumore e l'eccessiva riverberazione di una sala, portano l'insegnate a parlare con un livello di voce elevato, causando problemi di voce e gola. Statisticamente il problema è registrato perché è segnalata una incidenza dei problemi legati alla voce tra gli insegnati rispetto alla popolazione in generale.

2.2 Rischio di danno uditivo negli ambienti di lavoro

2.2.1 Misurare il rumore: il livello sonoro continuo equivalente

Entrando nello specifico argomento della tesi, in situazioni come quella che si presenta in una mensa, oltre al corpo insegnante, è presente il personale addetto al servizio di ristorazione: entrambe le categorie hanno dimostrato molte volte di non tollerare il rumore prodotto dai bambini e di avere notevole difficoltà a comunicare sia tra di loro che con gli studenti. Non solo ma sono sottoposti nell'arco della giornata ad un livello sonoro sempre piuttosto elevato.

Livelli elevati ed esposizioni prolungate al rumore, come avviene in molti ambienti di lavoro, possono procurare danni alla salute del lavoratore e soprattutto menomare la sua funzione uditiva con perdita dell'udito, menomazione definita come ipoacusia da rumore.

Nel caso di rumori di tipo continuo, livelli di pressione sonora ponderati in scala "A" oltre i 140 dB producono in breve tempo la perdita di sensibilità uditiva, mentre livelli inferiori ai 70 dB sembra che non producano alcuna riduzione della sensibilità uditiva anche in soggetti esposti per lungo tempo al rumore. Ai livelli intermedi la perdita di sensibilità uditiva dipende dall'intensità del rumore, aumenta con la durata dell'esposizione e si manifesta inizialmente per frequenze tra i 4 e i 6 kHz, anche per rumori di tipo impulsivo (questo fenomeno non è particolarmente chiaro perché negli ambienti industriali i rumori in genere toccano la massima intensità tra i 250 e i 1000 kHz ma la perdita di sensibilità uditiva dopo molti anni di esposizione si verifica inizialmente intorno ai 4 kHz).

L'ipoacusia da rumore si manifesta da prima come innalzamento permanente della soglia di udibilità intorno alle frequenze di 4, 5 e 6 kHz ed è rilevabile solo con misure

audiometriche; solo con il passare del tempo, permanendo l'esposizione al rumore, il fenomeno interessa le frequenze di 500, 1000 e 2000 Hz e viene avvertito dal lavoratore per la ridotta capacità di comprendere il parlato.

Se non si può eliminare il rumore o ridurne i livelli, l'alternativa è quella di limitare il tempo di esposizione poiché il danno all'udito è direttamente correlato con l'energia acustica che raggiunge l'orecchio.

Per contrastare l'insorgere negli ambienti di lavoro dei fattori di rischio da rumore le possibilità e le modalità di intervento possono essere molte ma la stesura di specifiche normative tecniche e l'introduzione di una normativa adeguata si sono dimostrati fondamentali per la prevenzione nei confronti di questo danno.

In Italia ciò è avvenuto con un certo ritardo rispetto agli altri paesi europei dopo l'obbligo di recepire la direttiva CEE 86/188 riguardante la "protezione dei lavoratori contro i rischi derivanti dall'esposizione al rumore durante il lavoro" pubblicata il 12 maggio del 1986. In seguito a questo obbligo è stato pubblicato il D.L. n. 277/1991.

L'indice descrittore universalmente utilizzato nelle misure di rumorosità negli ambienti di lavoro è il L_{Aeq}, cioè il livello sonoro continuo equivalente.

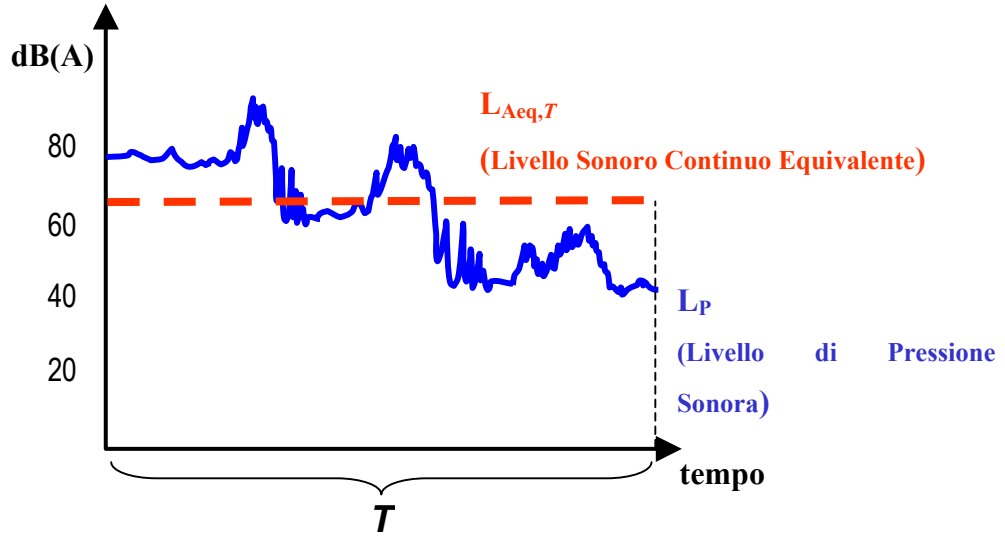


Fig. 2.1 - *Grafico del livello sonoro continuo equivalente*

Il rumore può variare nel tempo e per tenere in considerazione la sua variazione nel tempo si utilizza il livello sonoro continuo equivalente ponderato "A":

$$L_{Aeq,T} = 10\log[\frac{1}{T}\cdot\int_0^T(\frac{p_a}{p_0})^2\,dt] \qquad [\text{dB(A)}]$$

dove p_a è la pressione acustica istantanea ponderata A e p_0 è la pressione acustica di riferimento, pari a 20 μPa.

2.2.2 Il livello di esposizione personale: la normativa vigente

Sulla base del livello sonoro continuo equivalente, il Decreto Legislativo 15 agosto 1991, n.277, definisce dei livelli di esposizione personale quotidiana ($L_{EP,d}$) e settimanale ($L_{EP,w}$) al rumore. Il $L_{EP,d}$ viene definito come il livello sonoro continuo equivalente, avente la stessa percentuale di rischio di danno uditivo che si ha nelle condizioni di rumore variabili reali, a cui risulta esposto complessivamente ogni lavoratore nel corso dell'intera giornata lavorativa. L'esposizione quotidiana di un lavoratore al rumore si esprime in dB(A) e si calcola su 8 ore:

$$L_{EP,d} = L_{Aeq,T} + 10\log\frac{T_e}{T_0} \qquad [\text{dB(A)}]$$

dove $L_{Aeq,T}$ è il livello sonoro continuo equivalente misurato in corrispondenza di una postazione di lavoro; T_e è la durata quotidiana dell'esposizione personale di un lavoratore a $L_{Aeq,T}$, e T_0, è il tempo di riferimento pari a 8 ore.

Se l'esposizione al rumore del lavoratore varia in base ai giorni della settimana lavorativa, è necessario calcolare il livello di esposizione settimanale personale $L_{EP,w}$ come media logaritmica dei livelli di esposizione giornaliera calcolati per gli "m" giorni di lavoro della settimana considerata:

$$L_{EP,w} = 10\log\left[\frac{1}{5}\sum_{k=1}^{m} 10^{0.1(L_{EP,d})k}\right] \qquad [\text{dB(A)}]$$

Definiti il livello di esposizione personale quotidiana e settimanale, la legge individua quattro classi di esposizione al rumore:

1ª classe: con esposizione quotidiane fino a 80 dB(A)

2 ª classe: con esposizione quotidiane superiori a 80 fino a 85 dB(A)

3 ª classe: con esposizione quotidiane superiori a 85 fino a 90 dB(A)

4ª classe: con esposizione quotidiane superiori a 90 dB(A)

Valori di esposizione quotidiana dB(A) o di pressione non ponderata (dB)	**Misure da adottare**
< 80 dB(A)	Nessuna
80 – 85 dB(A)	• Informazione dei lavoratori a cura del datore di lavoro sui rischi derivanti l'esposizione a rumore, sui messi individuali di protezione, sulle misure di protezione a cui i lavoratori devono uniformarsi, sulle misure adottate in applicazione delle norme del D.Lgs., sul significato e sui risultatati della valutazione di cui all'art.40 • Su richiesta dei lavoratori e conferma del medico competente, la disposizione del controllo sanitario
85 – 90 dB(A)	• Predisposizione dei mezzi individuali di protezione; • Informazione dei lavoratori a cura del datore di lavoro sull'uso corretto dei mezzi individuali di protezione e di utensili, macchine e apparecchiature ai fini della riduzione al minimo dei rischi dell'udito; • Controllo sanitario periodico con intervalli non superiori ai due anni.
90 dB(A) o valori istantanei > 140 dB	• Segnaletica appropriata, perimetrazione e limitazione di accesso all'area interessata dal superamento; • Obbligo di utilizzo dei mezzi individuali di protezione; • Consultazione dei lavoratori per la scelta dei mezzi individuali di protezione; • Controllo sanitario periodico con intervalli non superiori ad un anno; • Comunicazione, entro 30 giorni dall'accertamento, all'organo di vigilanza, sulle misure tecniche e organizzative applicate in conformità dell'art. 41, c 1 del D. Lgs. 277/1991

Tab. 2.1 - *Esposizione al rumore dei lavoratori e misure da adottare*

Particolare responsabilità ricadono sul datore di lavoro: tra le sue precise incombenze, va tenuto presente che egli, oltre ad individuare con apposita segnaletica le zone dove l'esposizione quotidiana personale supera i 90 dB o il livello istantaneo della pressione acustica supera i 140 dB, deve informare i lavoratori su rischi connessi all'esposizione al rumore nel caso che l'esposizione quotidiana personale superi gli 80 dB. Inoltre, se l'esposizione quotidiana personale al rumore supera gli 85 dB, il datore di lavoro deve fornire mezzi individuali di protezione dell'udito, adattati al singolo lavoratore e alle

sue condizioni di lavoro. Questi dispositivi devono essere obbligatoriamente utilizzati dal lavoratore quando l'esposizione quotidiana personale al rumore supera i 90 dB e devono avere caratteristiche tali da ridurre il rischio a un valore uguale o inferiore a quello dell'esposizione quotidiana al rumore di 90 dB. Il tutto deve essere completato da una adeguata formazione sull'uso corretto dei mezzi di protezione, degli utensili e delle apparecchiature, il cui funzionamento è causa di rumore.

La riduzione del rumore alla fonte è il mezzo migliore per proteggere la salute dei lavoratori. Questo criterio è più volte richiamato nel D.L. 277/1991, che fa obbligo al datore di lavoro di "*ridurre al minimo, in relazione alle conoscenze acquisite in base al progresso tecnico, i rischi derivanti dall'esposizione al rumore mediante misure tecniche, organizzative e procedurali, concretamente attuabili, privilegiando gli interventi alla fonte* " ed inoltre di preferire "*all'atto dell'acquisto di nuovi utensili, macchine, apparecchiature, quelli che producono, nelle normali condizioni di funzionamento, il più basso livello di rumore*".

2.3 Il comfort acustico nelle mense: un compromesso tra intelligibilità e privacy

Definiti gli aspetti legali di prevenzione dei fattori di rischio da rumore, si può passare a stabilire quale siano le condizioni di comfort ambientale che si devono verificare all'interno di una mensa scolastica.

Il comfort acustico viene definito come quella condizione psicofisica per cui un individuo, immerso in un campo sonoro, si trova in condizioni di benessere in relazione all'attività che sta svolgendo. Se vogliamo estendere questa definizione al caso dei locali da ristorazione, la questione si complica ulteriormente poiché la percezione del fastidio causato dai rumori presenti in ambiente (conversazioni, stoviglie, rumori esterni, ecc...) dipende dalla tipologia del locale e dall'aspettative del cliente. Per esempio nella sala da pranzo di un ristorante (luogo in genere caratterizzato da una certa intimità) può risultare molto fastidioso essere disturbati da una eccessiva confusione e non riuscire a dialogare con i commensali al proprio tavolo mentre, al contrario, in un fast food un certo fastidio può essere utile ad incentivare la rotazione della clientela e a creare una certa vivacità d'ambiente gradito di certo ad un pubblico molto giovane.

Un problema che spesso viene percepito nelle sale dei ristoranti è quello per cui la *comunicazione* risulta disturbata da un alto *rumore di fondo* ma dove, al tempo stesso, la

privacy ai tavoli non è assicurata. Questo indubbiamente è un problema importante soprattutto perché oggi i ristoranti sono concepiti non più solo come luoghi per consumare semplicemente un pasto, ma anche luoghi per socializzare e ricaricarsi prima di tornare ai soliti ritmi di vita frenetici.

Se è chiaro che in una sala di un ristorante siano fondamentali requisiti di privacy e intelligibilità, in una mensa scolastica il problema è un po' più complesso. Innanzi tutto i bambini durante l'ora del pranzo non parlano ma urlano. E più urlano più continueranno a farlo per farsi capire dai compagni: questo è un chiaro esempio del C*ocktail Party Phenomenon,* fenomeno che si presenta quando un individuo, per farsi sentire dal suo interlocutore, parla tanto più forte quanto più forte parlano le altre persone presenti nella stanza, e così via, sempre in crescendo.

Detto questo, il problema fondamentale da risolvere all'interno di una mensa è principalmente quello di *ridurre il rumore di fondo*: infatti questi ambienti scolastici in genere contengono un gran numero di bambini che per un'ora circa passano tutti quanti insieme il loro tempo che è dedicato proprio solo allo svago.

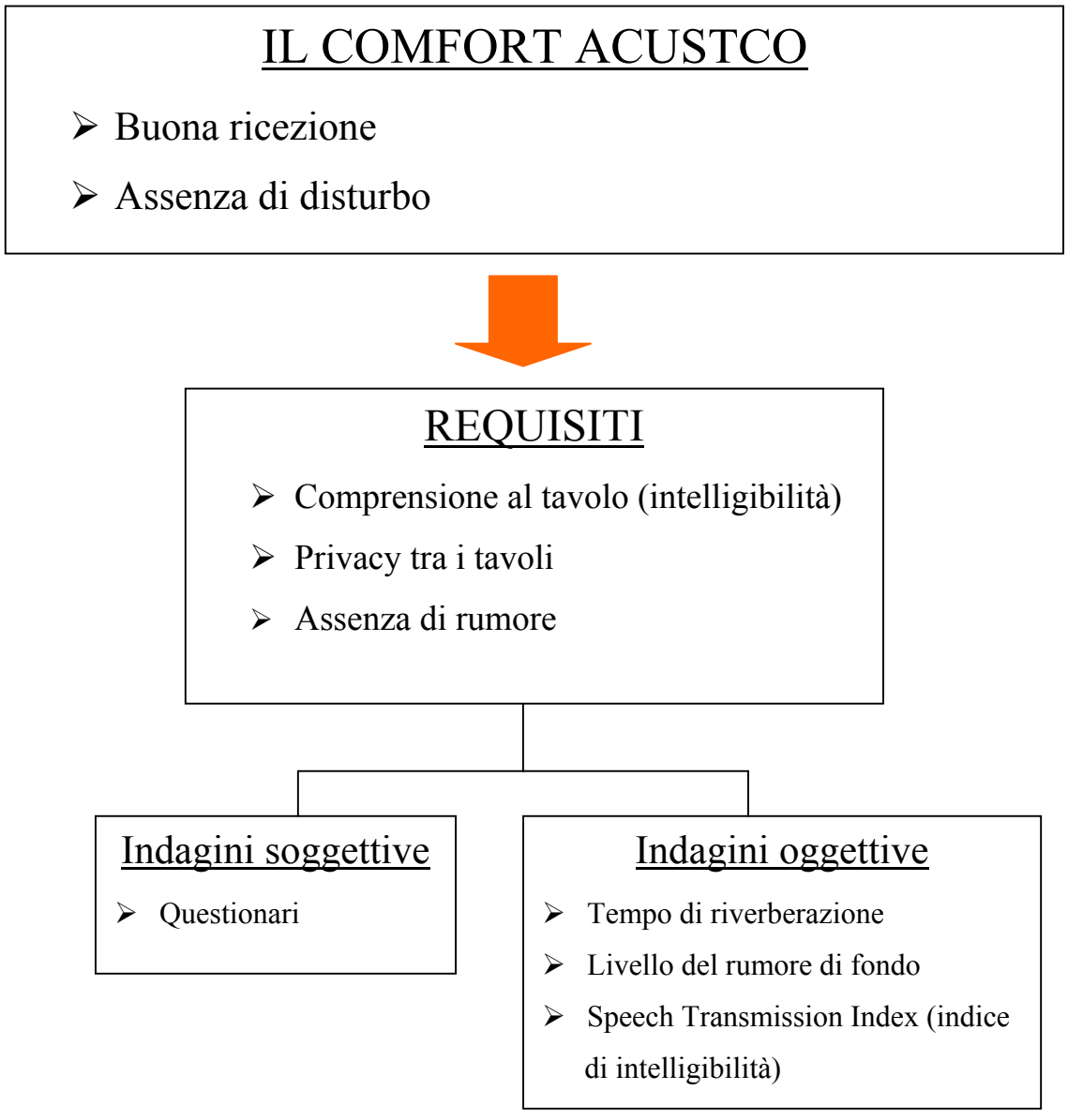
In questa situazione un metodo particolarmente efficace per risolvere gran parte dei problemi per avere una corretta acustica, è più in generale quello di correggere l'ambiente acustico con accorgimenti puramente progettuali, per esempio intervenendo sul *tempo di riverberazione*; al tempo stesso è importante intervenire su altri fattori come sulla *densità di occupazione* della sala. A tal proposito stabilire un corretto numero di commensali è piuttosto difficile, anche perché in genere il livello di rumore di fondo dipende molto dal tipo di clientela: nel caso di un ristorante ad esempio famiglie con bambini piccoli sono di sicuro più rumorose anche solo di giovani coppie e, all'interno di una mensa, abbiamo proprio solo bambini la cui unica attività, oltre a consumare il pranzo, è quella di distrarsi.

Partendo dal presupposto che queste mense sono frequentate da bambini delle scuole elementari, che sono inevitabilmente molto rumorosi soprattutto durante l'ora del pranzo, quello che si vuole individuare in questo studio è una correlazione tra alcuni parametri oggettivamente misurati, come per esempio il tempo di riverberazione e indice di intelligibilità STI (Speech Transmission Index), e una corretta comunicazione nonché privacy al proprio tavolo (anche se, come ho già accennato, i bambini hanno dimostrato di non comprendere bene il significato di privacy). Sia l'intelligibilità che la privacy possono essere definite in base alla percentuale di frasi correttamente comprese anche perché sottolineano lo stesso problema a partire però da due punti di vista

differenti: se al tavolo la percentuale di frasi comprese deve essere alta, al contrario tra i diversi tavoli deve essere bassa.

A questo punto, definite queste due esigenze come importanti per gli ambienti della ristorazione, dopo un capitolo sulla intelligibilità della parola, presento i diversi casi studio con i relativi risultati di analisi di bontà acustica.

Lo schema inserito rappresenta i passaggi seguiti per lo studio dell'acustica delle tre mense oggetto di studio, partendo dal presupposto quindi di garantire ai commensali condizioni ottimali di comfort acustico.



2.4 Bibliografia

1. S. CINGOLANI, R. SPAGNOLO, *Acustica musicale e architettonica*, Torino, UTET, 2005
2. A. ASTOLFI, *Schede di fisica tecnica ambientale, Acustica,* Torino, Politeko, 2001
3. R. SPAGNOLO, *Manuale di Acustica*, Torino, UTET, Marzo 2001
4. AA.VV., *Conoscere per prevenire n° 8. Valutazione del rischio derivante dall'esposizione al rumore durante il lavoro nelle attività edili. D.lgs. 277/91 494/96*, Comitato paritetico territoriale per la prevenzione infortuni, l'igiene e l'ambiente di lavoro di Torino e provincia, Torino, CPT, 2000
5. A. COCCHI, *Inquinamento da rumore*, Rimini, Maggioli Editore, 1998
6. AA.VV., *Acustica nell'edilizia*, Torino, Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris, 1998
7. E. CIRILLO, *Acustica Applicata*, Milano, Mc Graw-Hill, 1997

Normativa

8. D.Lgs. 277 1991 - *"Attuazione delle direttive n.80/1107/CEE, N. 82/605/CEE, N. 83/477/CEE, N. 86/188/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 legge 30 luglio 1990, N. 212 "*

Articoli

9. B.M.SHIELD, J. E. DOCKRELL, *La necessità di una buona acustica nelle aule scolastiche*, Seminario acustica e ambienti scolastici, Congresso Associazione Italiana Acustica, Venezia 5 maggio 2004

Tesi di laurea

10. C. GULINO, *L'acustica nelle aule scolastiche*, Politecnico di Torino, Facoltà di Architettura, relatori: prof. Marco Filippi, arch. Arianna Astolfi, A.A. 2001- 2002

CAPITOLO 3

INTELLIGIBILITA' DEL PARLATO

3.1 Il comfort acustico

Il comfort acustico può essere definito come quella condizione psicofisica per cui un individuo, immerso in un campo sonoro, si trova in condizione di benessere, in relazione all'attività che sta svolgendo.

Il comfort acustico è condizionato da diverse situazioni, complementari tra loro, come le caratteristiche fisiche della sorgente (la potenza acustica, lo spettro, la durata e l'andamento nel tempo), le caratteristiche dell'ambiente (la riverberazione e la diffusione del suono), le caratteristiche psicofisiche degli individui (sensibilità al disturbo e l'acuità uditiva) e dalla attività svolta dai soggetti presenti nell'ambiente oggetto di studio. Data la complessità delle interazioni tra queste condizioni, risulta impossibile individuare un unico indice di valutazione del benessere che esprima la sensazione provata da una significativa percentuale di ascoltatori. È possibile però determinare la qualità acustica di un ambiente grazie all'uso di alcuni indici che consentono di individuare alcuni differenti aspetti della percezione sonora.

I requisiti essenziali da soddisfare in ambienti destinati all'ascolto della parola, sono *l'assenza di disturbo* e la *buona ricezione*. Il soddisfacimento di questi requisiti porta al conseguimento di condizioni ottimali di *intelligibilità* della parola.

3.2 Assenza di disturbo

Per avere *assenza di disturbo* è necessario che sia assente il rumore di fondo, che maschera il suono prodotto dal parlatore, ma anche qualunque suono sgradevole che provochi uno stato generale di intolleranza nei confronti dell'ambiente acustico.

Va ricordato che la tollerabilità di un individuo dipende da fattori che dipendono in parte dalle caratteristiche fisiche e oggettive del rumore, come la sua caratteristica spettrale, la durata, le caratteristiche temporali, la fluttuazione di livello e di frequenza e il contenuto informativo, e in parte sono di natura psicologica e riguardano direttamente il soggetto, come la predisposizione individuale al rumore rispetto all'attività svolta,

l'adattamento al rumore, il riconoscimento del rumore e la possibilità o meno di evitare il rumore.

Con la necessità di porre dei limiti normativi a questo tipo di disturbo, nasce l'esigenza di definire un indice di valutazione del disturbo da rumore e ha portato all'assunzione del livello continuo equivalente di pressione sonora ponderato A, $L_{Aeq,T}$, come indice descrittore della composizione in frequenza e dell'andamento temporale del fenomeno acustico. Questo indice è assunto per caratterizzare convenzionalmente la risposta soggettiva al rumore di un individuo medio. Adottando il L_{eq} , per tener conto della sua variazione nel tempo, l'effetto disturbante del rumore viene correlato al contributo energetico medio in un intervallo di tempo piuttosto che all'energia sonora istantanea effettivamente percepita.

$$L_{Aeq,T} = 10\log\left[\frac{1}{T}\cdot\int_0^T 10^{\frac{L_{glob}(A)(t)}{10}}\,dt\right] \qquad \text{[dB(A)]}$$

Valori di riferimento negli ambienti confinati sono fissati dalle normative in base alla loro destinazione d'uso.

Dato che due rumori caratterizzati da uno stesso L_{eq} possono produrre un effetto di fatto differente, a questo indice viene di solito affiancato un criterio di valutazione che consente di studiare in modo più preciso la distribuzione spettrale e temporale dell'energia sonora. È stato infatti dimostrato che il rumore che presenta enfatizzazione dei livelli alle basse frequenze può interferire pesantemente sulla concentrazione mentale di un individuo rispetto ad un rumore valutato equivalente ma con uno spettro più sbilanciato verso le medie frequenze. In aiuto dell'indice L_{eq} ci sono valutazioni sul bilanciamento dello spettro che si possono effettuare con criteri definiti dalle curve RC, *Room Criteria* e NCB, *Balanced Noise Criterion*, curve che valutano il bilanciamento dello spettro del rumore, l'interferenza del rumore sul parlato e indicano la presenza di vibrazioni indotte dal rumore a bassa frequenza su strutture leggere.

3.3 Buona ricezione

La *buona ricezione* è legata alla presenza di un sufficiente livello sonoro e alla percezione ottimale delle onde sonore dirette e riflesse dalle superfici dell'ambiente. Nel caso dell'ascolto della parola, non tutta l'energia di riverberazione torna utile alla

corretta comprensione dei segnali emessi dalla sorgente. Al contrario, buona parte di essa finisce spesso per costituire una sorta di disturbo del tutto indesiderabile. Il contributo delle onde riflesse deve essere tale da rafforzare il livello sonoro diretto, senza che una eccessiva durata della "coda" sonora mascheri il segnale successivo.

La grandezza fisica base che definisce la qualità acustica di un ambiente confinato è il tempo convenzionale di riverberazione. Il valore ottimale del tempo di riverberazione rappresenta il giusto compromesso tra il raggiungimento di un livello sonoro sufficiente per un'audizione senza sforzo, in tutti i punti dell'ambiente, e la riduzione del disturbo provocato da un eccesso di riverberazione.

La determinazione di questo valore ottimale è ottenuta mediante valutazioni soggettive e dipende dalla frequenza, dal volume dell'ambiente e dalla destinazione d'uso dei locali. In generale per gli ambienti destinati all'ascolto della parola è privilegiato il suono diretto rispetto a quello riverberato e si indicano valori di τ_{60} più brevi rispetto a quelli ideati per le sale destinate all'ascolto della musica.

Ambiente	$T_{OTT,1000}$
Sala conferenza	<1 s
Teatri d'opera	1.2 - 1.8 s
Sale per musica da camera	1.4 - 2 s
Grandi sale da concerto	1.7 – 2.3 s
Chiese	2 – 4 s

Tab. 3.1 - *Tempo di riverberazione ottimale in base alla destinazione d'uso*

Il valore ottimale del tempo di riverberazione alla frequenza di 1000 Hz si può desumere dalla formula empirica :

$$\tau_{ott,1000} = k \cdot \sqrt[9]{V} \qquad [s]$$

dove k può variare in base ai valori indicati nella tabella sottostante e V è il volume dell'ambiente in m^3.

K	*Destinazione d'uso*
0.3-0.4	Linguaggio parlato
0.5-0.8	Musica

3.4 Intelligibilità della parola

L'elevata rumorosità di fondo e la presenza di una eccessiva riverberazione pregiudicano l'intelligibilità della parola, definita come percentuale di parole o frasi correttamente comprese da un ascoltatore rispetto alla totalità delle parole o frasi pronunciate da un parlatore.

Le condizioni ottimali per una corretta comprensione verbale sono definibili in relazione alla destinazione d'uso dell'ambiente e quindi dall'attività svolta dagli occupanti. Infatti in un'aula scolastica un rumore di fondo piuttosto basso è indispensabile per conseguire la massima intelligibilità. Un caso più complesso è quello di un ufficio open space: ammettendo condizioni di riverberazione ottimali, il rumore di fondo non dovrà essere elevato, per evitare di disturbare ad esempio le comunicazioni telefoniche e tra le persone presenti, ma non dovrà essere neanche assente, per permettere una adeguata privacy.

L'intelligibilità della parola, oltre dalla destinazione d'uso e dai fenomeni ambientali sopra citati, è fortemente influenzata dalle caratteristiche di emissione della voce umana, in particolar modo dall'intensità di emissione, dalla composizione in frequenza, dall'andamento temporale e dalla direzionalità e da altri fattori come quelli di natura linguistica, cioè di tutte quelle strutture linguistiche che forniscono all'ascoltatore il senso generale del messaggio.

Esistono numerosi modi per valutare l'intelligibilità del parlato in un ambiente tra cui metodi di misura di tipo diretto, che comportano la realizzazione di test di intelligibilità con l'uso di frasi o parole in rima e prevedono l'interazione di parlatori e di gruppi di ascoltatori. Questo tipo di misura presentano lo svantaggio di essere piuttosto laboriose e richiedono tempi lunghi di elaborazione. Negli anni si è sentita perciò l'esigenza di realizzare altre tecniche che permettano di valutare l'intelligibilità tramite indici che si basano su parametri oggettivi e facilmente misurabili.

I parametri oggettivi dai quali dipende l'intelligibilità del parlato sono il tempo di riverberazione e il rapporto segnale/rumore, definito, in un punto, come differenza tra il livello del segnale, cioè la voce umana, e il livello del rumore di fondo.

I più comuni indici che si basano prevalentemente sul rapporto segnale/rumore sono: AI (*Articulation Index*), SIL (*Speech Interference Level*), SII (*Speech Intelligibilità Index*), STI (*Speech Transmission Index*) e il RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*).

In ogni caso in determinate situazioni i test di tipo diretto sembrano fornire risultati migliori rispetto a quelli di tipo indiretto, perché usano ascoltatori reali in situazioni reali. Basti pensare a situazioni di vita quotidiana quali il sistema di annunci aeroportuali e quelli di una stazione ferroviaria. In casi del genere oltre alla qualità e fedeltà dell'impianto va verificata l'intelligibilità degli annunci che, ovviamente, devono raggiungere tutti gli utenti. Questi sono degli esempi in cui vengono tutt'ora utilizzate misure dirette di intelligibilità.

3.4.1 Misure basate sul rapporto segnale rumore

Articulation Index

Le prime tecniche di tipo indiretto per la determinazione dell'intelligibilità del parlato si basarono sul calcolo dell'indice di articolazione (AI).

L'AI è nato alla fine degli anni Quaranta nei laboratori Bell come indice per lo studio dell'intelligibilità nei collegamenti telefonici e negli anni Sessanta il metodo è stato esteso al caso di ascolto binaurale.

L'AI si calcola in base al rapporto pesato alle diverse frequenze tra il segnale utile e il rumore di fondo. Questo metodo è applicabile si in campo libero che in ambienti con minima riverberazione, laddove la riverberazione non sia trascurabile allora l'indice viene opportunamente ridotto in alcuni punti in base al tempo di riverberazione dell'ambiente.

Per ottenere un'intelligibilità soddisfacente (> 95% per frasi complete), l'indice AI deve essere superiore a 0.4.

$$AI = \sum (L_S - L_N) \cdot w_i$$

L'indice AI si ottiene dalla sommatoria delle differenze tra i livelli di pressione sonora della voce L_S e i livelli di rumore di fondo L_N, opportunamente pesati in ragione della frequenza tramite un fattore w_i.

Speech Interference level

Come l'AI, anche il SIL, *Speech Interference Level*, viene applicato in quegli ambienti dove la riverberazione risulti trascurabile. È stato messo a punto negli anni Quaranta per

studiare l'intelligibilità all'interno delle cabine di pilotaggio degli aerei e pone in relazione il rumore di fondo con la qualità dell'ascolto.
Il livello di interferenza si calcola nella posizione dell'ascoltatore come media aritmetica dei livelli sonori del rumore di fondo per le bande di ottava con frequenze centrali di 500, 1000, 2000 e 4000 Hz, (che questo metodo considera producente interferenza con il parlato) .

$$L_{SIL} = \frac{1}{4}\sum_{i=1}^{i=4} L_{Ni} \qquad [\text{dB}]$$

Vi è poi una correlazione tra il livello di interferenza e la distanza massima tra il parlatore e l'ascoltatore per una soddisfacente comunicazione verbale.
Si calcola successivamente il livello di pressione sonora della voce nella posizione dell'ascoltatore $L_{S,A}$:

$$L_{S,A} = L_{S,A,1m} - 20\log\frac{r}{r_0} \qquad [\text{dB(A)}]$$

Dove $L_{S,A,1m}$ è il livello di pressione sonora (livello globale ponderato A) della voce umana a 1 m di distanza dalla bocca del parlatore, r è la distanza tra il parlatore e l'ascoltatore e r_0 equivale a 1 m.

Sforzo vocale	$L_{S,A,1m}$ a a 1000 Hz
Rilassato	54
Normale	60
Elevato	66
Forte	78
Urlato	78

Tab. 3.2 - *Livelli di pressione sonora della voce umana ad 1 m di fronte alla bocca del parlatore per alcuni sforzi vocali a 1m (da ANSI S3.5)*

Ora si può valutare l'intelligibilità nella posizione dell'ascoltatore in base alle differenze fra il livello di pressione sonora della voce, in quella posizione, e il livello L_{SIL}:

$$SIL = L_{S,A} - L_{SIL} \qquad [\text{dB}]$$

Valutazione dell'intelligibilità	SIL [dB]
Buona	15 - 21
Discreta	10 - 15
Scarsa	3 - 10
Insufficiente	< 3

Tab. 3.3 - *Valutazione di intelligibilità*

Speech Intelligibility Index

Gli indici SII, *Speech intelligibility Index*, e STI, *Speech Transmission Index*, quantificano l'effetto combinato dell'interferenza del rumore di fondo e della riverberazione sulla riduzione di intelligibilità del parlato.

Lo SII e lo STI si ottengono a seguito di misure in campo, secondo una procedura con la quale si determina la riduzione dell'indice di modulazione di un segnale di test, dalla sua emissione alla sua ricezione. La misura (regolata rispettivamente dall'ANSI S3.5 e IEC 60268-16) si effettua con la sorgente nella posizione dell'oratore e con il microfono nella posizione dell'ascoltatore e richiede di generare un segnale portante caratteristiche spettrali e temporali di un campione di parlato continuo.

Il SII viene calcolato a partire dalla determinazione dei livelli equivalenti del parlato e del rumore e del livello equivalente di soglia di udibilità. Si ottiene come la somma dei contributi dell'energia delle diverse bande di frequenza sull'intelligibilità complessiva.

Per il suo calcolo sono stati normalizzati quattro metodi che differiscono di poco e che si riferiscono a bande di frequenze diverse:

a) 21 bande critiche
b) 18 bande di un terzo d'ottava
c) 17 bande critiche ad uguale contributo sull'intelligibilità
d) 6 bande d'ottava

Il metodo più comune prevede la misura del livello del parlato e del rumore in corrispondenza del timpano dell'ascoltatore. Questa procedura è in genere applicata per lo studio di intelligibilità per le comunicazioni telefoniche.

Una seconda procedura prevede che la misura avvenga in campo libero o in un ambiente con minime riflessioni, che le misure siano effettuate nella posizione dell'ascoltatore ma la sua applicabilità è vincolata al solo caso in cui il rumore sia indipendente dal parlato. Questa prevede il calcolo del livello spettrale equivalente del parlato e la misura del livello spettrale del rumore nella posizione dell'ascoltatore.

Il calcolo del livello spettrale equivalente del parlato parte dall'assunzione del livello spettrale del parlato standard a 1 m di distanza dalla bocca del parlatore in funzione dello sforzo vocale impiegato:

$$E_f^{'} = E_f - \log\frac{d}{d_0} \qquad [\text{dB}]$$

Dove $E_f^{'}$ è il livello spettrale del parlato ad 1 m di distanza parlatore, d e d_0 sono rispettivamente la distanza tra parlatore e ascoltatore e la distanza di riferimento di 1 m.

La terza procedura, meno generale, prevede misure in campo riverberato, dove l'orientamento dell'ascoltatore nei confronti sia del parlatore che del rumore è irrilevante, oppure in campo libero dove il livello del rumore non può essere misurato in assenza del parlato. Questa procedura è basata sulla determinazione della *Modulation Transfer Function* (MTF) e del livello spettrale combinato del parlato e del rumore (*CSNSN*, *Combined Speech and Noise Spectrum Level*). La MTF quantifica la riduzione dell'indice di modulazione del segnale test, in funzione della frequenza di modulazione. Per ciascuna frequenza di modulazione la MTF è determinata dal rapporto tra l'indice di modulazione del segnale in corrispondenza dell'ascoltatore, m_0, e l'indice di modulazione del segnale test, m_i.

La determinazione della MTF viene effettuata per ogni banda di frequenza (f) per 9 frequenze di modulazione (F). Si ottengono i valori di riduzione dell'indice di modulazione $m_{f,F}$ relativi a ciascuna banda di emissione per ciascuna frequenza di modulazione; per ogni valore di $m_{f,F}$ si calcola il rapporto segnale – rumore:

$$SNR_{f,F} = 10\log\left[\frac{m_{f,F}}{1-m_{f,F}}\right] \quad [\text{dB}]$$

I valori del rapporto segnale rumore sono assunti solo all'interno del range −15 dB +15dB.

A partire da R_f , valor medio di SNR, calcolato per ogni banda di frequenza, e dal livello spettrale combinato del parlato *CSNSL* (P_f), si possono ottenere i livelli spettrali equivalenti del parlato E'_f e del rumore N'_f:

$$E'_f = R_f + 10\log\frac{10^{0.1\cdot P_f}}{1+10^{0.1\cdot R_f}} \quad [\text{dB}]$$

$$N'_f = E'_f - R_f \quad [\text{dB}]$$

Ora la procedura diventa valida per tutte le diverse condizioni di calcolo descritte per verificare l'effetto di mascheramento del rumore sul parlato: si deve determinare il livello equivalente mascherante e il livello spettrale equivalente del rumore interno.

Il livello spettrale equivalente del rumore interno è calcolato come somma tra il livello spettrale di riferimento del rumore interno (da tabella) e il livello equivalente di soglia di udibilità. Quest'ultimo si assume pari a 0 per tutte le bande di frequenza nel caso di ascoltatori di età compresa tra i 18 e i 30 anni.

Il maggiore tra il livello spettrale equivalente mascherante il livello spettrale equivalente del rumore interno viene assunto come livello spettrale equivalente di disturbo D_f che servirà per calcolare il valore della funzione di udibilità:

$$A_f = L_f \cdot K_f$$

dove:

$$K_f = \frac{E'_f - D'_f + 15}{30}$$

$$L_f = 1 - \frac{E'_f - U_f - 10}{160}$$

L_f è il livello di distorsione del parlato e tiene conto della riduzione di intelligibilità per elevati sforzi vocali dell'oratore: si ottiene a partire dal livello spettrale equivalente del parlato e dal livello spettrale standard del parlato per lo sforzo vocale normale U_f.
Ora si può calcolare lo SII:

$$SII = \sum_{f=1}^{n} I_f \cdot A_f$$

I_f è la funzione d'importanza della banda ed è un valore numerico che caratterizza l'importanza relativa di una certa banda sull'intelligibilità e dipende dal tipo di segnale vocale emesso.
L'intelligibilità di una comunicazione può essere ritenuta soddisfacente se SII ha valori superiori a 0.75. Per valori inferiori a 0.45 invece la comunicazione è da ritenersi insoddisfacente.

Frequenza (Hz)	Coefficiente di Importanza della banda	Livello spettrale standard del parlato per un dato sforzo vocale (dB)				Livello spettrale di riferimento del rumore interno (dB)
		Normale	Elevato	Forte	Urlato	
250	0.0617	34.75	38.98	41.55	42.50	-3.9
500	0.1617	34.27	40.15	44.85	49.24	-9.7
1000	0.2373	25.01	33.86	42.16	51.31	-12.5
2000	0.2648	17.32	25.32	34.39	44.32	-17.7
4000	0.2142	9.33	16.78	25.41	34.41	-25.9
8000	0.0549	1.13	5.07	11.39	20.72	-7.1

Tab. 3.4 - *Livelli spettrali standard del parlato ad 1 m di fronte parlatore, in campo libero, coefficienti di importanza di banda e livelli spettrali di riferimento del rumore interno*

3.4.2 La misura dello STI

Lo STI è stato sviluppato a partire dagli anni Settanta ed la procedura si effettua con la sorgente nella posizione dell'oratore e il microfono in corrispondenza della testa dell'ascoltatore. Richiede la generazione un segnale test con caratteristiche di livello e direttività della voce umana per frequenze comprese tra 125 Hz e 8000 Hz.

Partendo dall'ipotesi che la voce umana possa essere considerata come costituita da un segnale modulato in ampiezza, in un ambiente si avranno buone condizioni di intelligibilità se si mantengono invariate le caratteristiche iniziali di modulazione esprimibili dall'indice di modulazione. La riduzione dell'indice di modulazione viene quantificata mediante la funzione di trasferimento della modulazione MTF.

Al variare della frequenza modulante tra i valori di 0.63 e 12.5 Hz si ottiene un insieme di 98 valori di MTF, corrispondenti a 14 dati per ciascun delle 7 bande d'ottava.

I valori del fattore di riduzione dell'indice di modulazione vengono poi corretti per tenere conto degli effetti di mascheramento uditivo.

Ognuno di questi valori corretti viene convertito in rapporto segnale - rumore apparente, utilizzando:

$$SNR_{f,F} = 10\log\left[\frac{m_{f,F}}{1-m_{f,F}}\right]$$

Ogni rapporto segnale - rumore è convertito in indice di trasmissione ($TI_{f,F}$), con valori compresi tra 0 e 1:

$$TI_{f,F} = \frac{SNR_{f,F} + 15}{30}$$

Per ogni banda d'ottava viene calcolato l'indice di trasferimento della modulazione:

$$MTI_f = \frac{1}{14}\sum_{f=1}^{14} TI_{f,F}$$

Successivamente i valori vengono mediati in un solo valore di STI compresi tra 0 che corrisponde a un giudizio di inintelligibilità e 1 che rappresenta una intelligibilità ottima:

$$STI = \sum_{f=1}^{7} \alpha_f MTI_f - \sum_{f=1}^{6} \beta_f \sqrt{MTI_f - MTI_{(f+1)}}$$

L'indice STI viene calcolato come somma pesata degli indici di trasferimento della modulazione per tutte le 7 bande di ottava.

La procedura per la determinazione del RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*) è semplificata rispetto a quella relativa allo STI; viene effettuata solo per le bande d'ottava a 500 Hz e 2 kHz e per ognuna di essa si considerano solo 4 o cinque frequenze di modulazione con segnale sinusoidale.

Classe di qualità	*Valori dell'indice STI*
Pessima	<0.2
Scadente	0.2 – 0.4
Discreta	0.4 – 0.6
Buona	0.6 – 0.8
Eccellente	>0.8

Tab. 3.5 - *Qualità della comunicazione in relazione ai valori dell'indice STI*

Rapid Speech Transmission Index (RASTI)

La procedura per la determinazione del RASTI (*Rapid Speech Transmission Index*) è semplificata rispetto a quella relativa allo STI e richiede una potenza di calcolo nettamente inferiore rispetto allo STI, che fino a poco tempo fa richiedeva tempi di calcolo piuttosto lunghi.

La misura viene effettuata solo per le bande d'ottava a 500 Hz e 2 kHz e per ognuna di essa si considerano solo 4 o cinque frequenze di modulazione con segnale sinusoidale.

L'applicazione del metodo è vincolata da alcune caratteristiche del sistema di trasmissione, dal rumore di fondo e della riverberazione:il sistema di trasmissione deve essere lineare; il rumore i fondo deve essere privo di toni udibili e picchi marcati e non deve avere carattere impulsivo; il rumore di fondo non deve variare nel tempo; il tempo di riverberazione non deve essere fortemente dipendente dalla frequenza.

I risultati che ho utilizzato per lo svolgimento della tesi e volti alla più semplice valutazione di intelligibilità del parlato all'interno delle mense scolastiche oggetto del mio studio, sono stati ottenuti con programmi di calcolo di cui poi descriverò la procedura più pratica che teorica.

3.4.2.1 Modulation Transfer Function

Lo STI si ottiene in seguito a misure in campo, secondo una procedura con la quale si determina la riduzione dell'indice di modulazione di un segnale test, dalla sua emissione alla sua ricezione. Tale segnale di test deve riflettere le caratteristiche delle voce umana e consiste in un rumore casuale filtrato per 7 bande d'ottava, da 125 Hz a 8000 Hz, e modulato in ampiezza, con indice di modulazione (m_i) pari a 1, secondo 14 frequenze di modulazione, comprese tra 0.63 Hz e 12.5 Hz, in intervalli di un terzo d'ottava.

La modulazione in ampiezza, (*Amplitude Modulation*) consiste nel variare, istante per istante, l'ampiezza di un segnale (*portante*), in funzione del valore di un altro segnale (*modulante*). La modulazione in ampiezza si ottiene moltiplicando cioè il segnale di test filtrato per ciascuna banda per:

$$(1 + m_i \cos 2\pi Ft)$$

dove F è la frequenza di modulazione.

Il rumore di fondo, l'eco e la riverberazione riducono la modulazione in ampiezza del segnale ricevuto secondo una funzione di trasferimento della modulazione (*Modulation Transfer Function*) che quantifica la riduzione dell'indice di modulazione del segnale di test in funzione della frequenza di modulazione. Per ciascuna frequenza di modulazione il fattore di riduzione dell'indice di modulazione è determinato dal rapporto tra l'indice di modulazione del segnale in corrispondenza dell'ascoltatore (m_0) e l'indice di modulazione del segnale di test (m_i).

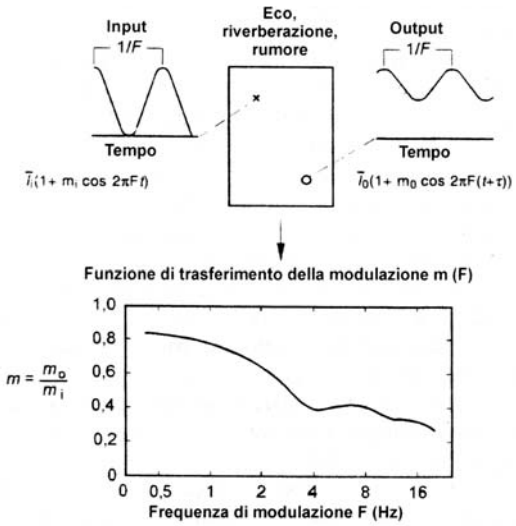


Fig.3.1 - *Riduzione della modulazione di un segnale vocale prodotta dal rumore di fondo, eco e dalla riverberazione*

Viene poi determinata una famiglia di curve della MTF, nella quale ogni curva è relativa a ciascuna banda di emissione del segnale vocale ed è definita da valori che il fattore di riduzione dell'indice di modulazione *m* assume per ogni frequenza mi modulazione.

I metodi di calcolo della funzione di trasferimento della modulazione possono essere divisi in due gruppi: si possono usare metodi basati sul segnale di test sinuisoidalmente modulato in ampiezza oppure metodi basati sulla misura della risposta all'impulso del sistema. I primi sono utilizzati di rado perché richiedono tempi piuttosto lunghi e si creano problemi legati alla non stabilità del rumore di fondo durante le misure. Il secondo tipo di misure ricava le MTF dalla risposta all'impulso h(τ), seguendo l'approccio suggerito da M. Schroeder :

$$m(F) = \frac{\int h_f^2(\tau) \cdot \exp(-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot F \cdot \tau) \cdot d\tau}{\int_0^{\infty} h_f^2(\tau) \cdot d\tau}$$

dove $h_f(\tau)$è la risposta in frequenza per l'ottava di frequenza f.

Per questo tipo di tecnica, esistono due approcci differenti. Un primo metodo, consiste nell'usare un segnale pseudocasuale (MLS) filtrato secondo lo spettro della voce umana in presenza di rumore di fondo. In questo caso nel calcolo della risposta all'impulso viene già considerato l'effetto dovuto al rumore di fondo e le MTF sono calcolate secondo la formula di Schroeder. L'alternativa è quella di calcolare la risposta all'impulso e le MTF senza il rumore di fondo. Gli effetti del rumore di fondo possono essere inclusi nel calcolo con la seguente formula:

$$m(F) = m'(F) \cdot \frac{1}{1 + 10^{(\frac{L_{noise} - L_{signal}}{10})}}$$

3.4.2.2 La risposta all'impulso

Nello studio dell'acustica, l'ambiente viene schematizzato con il concetto di scatola nera: se $x(\tau)$ rappresenta il segnale emesso dalla sorgente e $y(\tau)$ è il risultato delle modifiche prodotte dal sistema (*black box*) sul segnale in ingresso (il segnale raccolto dall'ascoltatore), essi sono tra di loro correlati da una funzione F.

Cioè si ha che:

$$y(\tau) = F[x(\tau)]$$

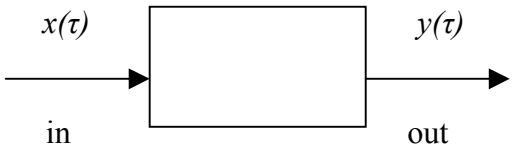


Fig. 3.2 - *Schematizzazione dell'ambiente come scatola nera*

Si suppone inoltre che il campo acustico sia lineare e tempo-invariante.
La linearità significa che la relazione appena descritta obbedisce al principio di sovrapposizione degli effetti:

$$x(\tau) = \sum_k a_k x_k(\tau)$$

$$y(\tau) = \sum_k a_k F[x_k(\tau)]$$

La tempo-invarianza significa che le caratteristiche del sistema rimangono fisse al variare del tempo: un ingresso $x(\tau-\tau_d)$, ossia con un ritardo di t_d, produce un'uscita:

$$F[x(\tau - \tau_d) = y(\tau - \tau_d)$$

E' possibile determinare le proprietà fisiche di un sistema lineare tempo-invariante attraverso la sua *risposta all'impulso*: cioè attraverso la sua risposta ad uno specifico segnale in ingresso.
Poiché nella risposta all'impulso sono presenti tutte le informazioni di cui è dotato il sistema, risulta indispensabile, per una corretta e completa caratterizzazione dell'acustica di un ambiente, determinare proprio la sua risposta all'impulso.

La risposta all'impulso *h(τ)* è la risposta del sistema nell'ipotesi che la sorgente sonora generi un segnale *x(τ)* particolare. Ossia un solo impulso unitario preceduto e seguito da una infinità di zeri. Esso è chiamato "*funzione delta di Dirac*":

$$\delta(\tau) = 0 \qquad \text{per } \tau \neq 0 \qquad \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(\tau) d\tau = 1$$

In generale, dato un segnale qualsiasi *x(τ)* generato dalla sorgente, il segnale percepito dal ricevitore in una particolare posizione si ottiene tramite il cosiddetto integrale di convoluzione, dato dall'espressione:

$$y(\tau) = x(\tau) \otimes h(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} a(\tau) h(\tau - 1) d\tau$$

La problematica delle misurazioni e della simulazione acustica può essere ricondotta in sintesi alla determinazione della risposta all'impulso: quando *x(τ)* è la pressione sonora alla sorgente e l'uscita *y(τ)* è la pressione sonora al ricevitore, nota la quale si possono calcolare i parametri acustici di interesse.
Il segnale in ingresso e di uscita possono essere rappresentati da due vettori x e y.

X(1)	X(2)	X(3)	X(4)	X(5)	X(6)	X(7)	…	X(n)
Y(1)	Y(2)	Y(3)	Y(4)	Y(5)	Y(6)	Y(7)	…	Y(n)

I dati *y(n)* non sono semplicemente in funzione dei dati in ingresso *x(n)* ma anche di un certo numero di campioni in entrata, precedenti a *x(n)*.
Questo può essere spiegato facilmente pensando che se il segnale in ingresso fosse rappresentato da una sequenza di zeri (che corrisponde ad un momento di silenzio) seguita da una serie di numeri non nulli (ovvero da rumore), il segnale in uscita dovrebbe avere prima dei valori non nulli, una serie di zeri iniziali, ma di lunghezza differente rispetto a quella in ingresso: ciò perché la risposta del sistema non può essere immediata, né quando il sistema viene eccitato, quando cioè inizia il segnale rumoroso, né quando il sistema ritorna allo stato iniziale (coda sonora).
In termini matematici si scrive:

$$y_n = x_n h_0 + x_{n-1} h_1 + \ldots + x_{n-m+1} h_{m-1}$$

$$y(n) = \sum_{i=0}^{m-1} h(i) x(n-i)$$

Questa operazione è detta convoluzione che, si può diversamente scrivere con la notazione:

$$y(n) = x(n) \otimes h(n)$$

m sono il numero di campioni che rappresentano la risposta all'impulso: h_1 h_2,…, h_{m-1}.
La tecnica di misura dei coefficienti h della risposta all'impulso è teoricamente molto semplice: basta immettere nel sistema la funzione impulsiva ideale, δ di Dirac, ovvero un segnale costituito da un campione avente il valore massimo consentito dalla rappresentazione digitale impiegata seguito solo da numeri nulli .

1	0	0	0	0	0	0	0	0

Convolvendo la δ di Dirac si ottengono quindi:

$$y_1 = 1 \cdot h_1 + 0 \cdot h_2 + 0 \cdot h_3 = h_1$$
$$y_2 = 0 \cdot h_1 + 1 \cdot h_2 + 0 \cdot h_3 = h_2$$
$$y_3 = 0 \cdot h_1 + 0 \cdot h_2 + 1 \cdot h_3 = h_3$$

Ad ogni passo di campionamento si ottiene un coefficiente *h*.
Questo tipo di misurazione è piuttosto difficile da realizzare in pratica: alimentando un altoparlante con il segnale, esso dovrebbe essere in grado di produrre un impulso molto breve e di elevata potenza poiché per ottenere una buona misurazione si dovrebbe superare di 60 dB il rumore di fondo. Una possibile soluzione consiste nell'uso di una sorgente sonora di tipo esplosivo come per esempio una pistola a salve che però non fornisce un segnale che dura un periodo di campionamento, ma arriva a qualche decina di periodi.

Ora l'idea alternativa da seguire non è particolarmente complessa: partendo dal fatto che

$$y = h \otimes x$$

si supponga di trovare un segnale x dotato di una x^{-1} tale che il loro prodotto di convoluzione fornisca la δ di Dirac:

$$x \otimes x^{-1} = \delta$$

Poiché il prodotto di convoluzione gode della proprietà commutativa:

$$y \otimes x^{-1} = x \otimes h \otimes x^{-1} = h \otimes x \otimes x^{-1} = h \otimes \delta = h$$

Riassumendo, il problema consiste nel determinare una coppia di segnali x e x^{-1}, il primo dei quali da utilizzare come test nell'ambiente di prova e il secondo, detto filtro inverso, da convolvere con l'output del segnale nell'ambiente stesso. Questa operazione che consente di ottenere la risposta all'impulso *h*, è detta *deconvoluzione*.

Non è semplice determinare le coppie di segnali a meno di non utilizzare un segnale di partenza x come costruito in modo da avere delle particolari proprietà matematiche, come accade con i segnali MLS oppure con i segnali sinusoidali tipo *sweep.*

Un segnale particolarmente efficace per la misurazione della risposta all'impulso è il MLS (Maximum Length Sequence) ed è costituto da una sequenza binaria. Ci sono una serie di caratteristiche che rendono particolarmente facile l'uso di questo segnale: poiché la sequenza è nota sin dall'inizio in maniera deterministica si trova facilmente MLS^{-1} come inversa nel tempo della sequenza originale; inoltre dato che il segnale binario è composto solamente da 0 e 1, il prodotto di convoluzione si semplifica enormemente trasformando le moltiplicazioni in semplici somme; lo spettro sonoro è piatto consente calcolare l'analisi in frequenza; inoltre possiede numerose proprietà a livello di campionamento dei suoni che facilitano anche da un punto di vista tecnico la campagna di misure.

Il principale problema della misura con tecnica MLS è dovuto alla suscettibilità a fenomeni di distorsione non lineare eventualmente presenti nella catena elettroacustica. Infatti, si possono notare in diverse situazioni, numerosi picchi causati dalle distorsioni

armoniche riscontrate durante il processo di misurazione, provocati da fenomeni non lineari nell'elettronica dei microfoni e dell'altoparlante.

Questi fenomeni possono essere evitati utilizzando altre tecniche di deconvoluzione che consentono di separare la non linearità della catena di misura dalla risposta acustica del sistema acustico.

Durante lo svolgimento della tesi, la risposta all'impulso è stata determinata, nei vari punti stabiliti all'interno delle mense, mediante il segnale sweep. Il segnale così definito è composto da una forma d'onda di tipo sinusoidale puro che parte dalle frequenze basse e sale verso l'alto al trascorrere del tempo. Questo segnale presenta un particolare vantaggio: il suo filtro inverso x^{-1} non è altro che il segnale di partenza ribaltato nell'asse dei tempi. Pertanto la determinazione numerica di x^{-1} è immediata e precisa.

3.5 Bibliografia

1. S. CINGOLANI, R. SPAGNOLO, *Acustica musicale e architettonica*, Torino, UTET, 2005
2. A. ASTOLFI, *Schede di fisica tecnica ambientale, Acustica,* Torino, Politeko, 2001
3. R. SPAGNOLO, *Manuale di Acustica*, Torino, UTET, Marzo 2001
4. AA.VV., *Corso di formazione in Acustica Applicata – Torino, maggio - giugno 1999*, Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris – Laboratorio di Acustica, Torino, 1999
5. E. CIRILLO, *Acustica Applicata*, Milano, Mc Graw-Hill, 1997

Tesi di laurea

6. A. MARCHIOLE', *L'acustica dei locali per la ristorazione,* Politecnico di Torino, Facoltà di Architettura, relatore: prof. Marco Filippi, A.A. 2001 - 2002

Articoli

7. A. FARINA, *Metodologie di misura e valutazione* – AES seminario 2001
8. A. W. BRONKHORST, *The Cocktail Party Phenomenon: A Review of Reserach on Speech Intelligibility in Multiple-Talker Condition*, ACTA ACUSTICA Vol. 86 (2000), pp. 117-128.
9. R. PLOMP, *Acoustical Aspects of Cocktail Parties,* ACUSTICA Vol. 38 (1977), pp. 186-191.

CAPITOLO 4

I CASI STUDIO

4.1 I casi studio

Grazie alla collaborazione dei responsabili di alcune scuole elementari del territorio piemontese, è stato possibile prendere in esame tre mense scolastiche diverse per dimensioni, struttura e tipologia.

Scuola elementare "Solaro"

Via Martiri della libertà 35, Livorno Ferraris (Vercelli)

La mensa di questa scuola si trova al pian terreno del complesso, dove sono situati locali di servizio. La mensa studiata frequentata solo da bambini che frequentano i primi 2 anni delle scuole elementari, mentre la seconda mensa, separata dalla prima da un semplice corridoio, è utilizzata da bambini del terzo e del quarto anno. Le aule sono invece posizionate al piano superiore, interamente dedicato alle attività didattiche, mentre il piano inferiore è destinato ai refettori e ai momenti di svago; le cucine sono in un altra ala del complesso e servono anche l'altra scuola di Livorno Ferraris, situata in viale IV novembre.

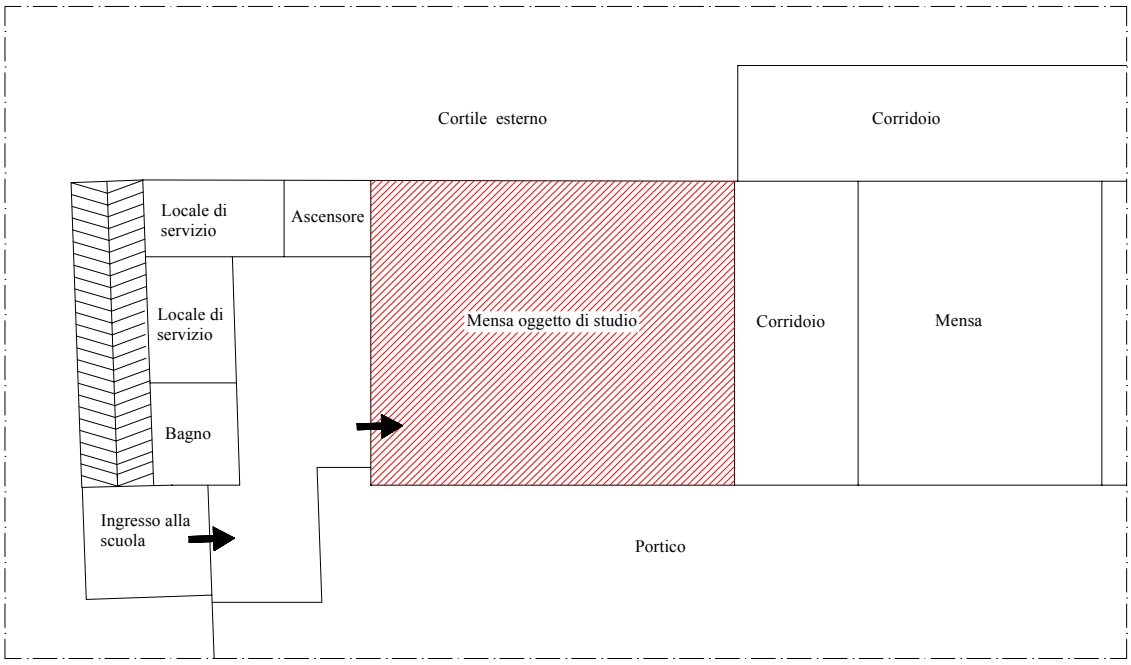


Fig. 4.1 - *Schema planimetrico di parte del complesso scolastico*

Tra le mese oggetto di studio è l'unica trattata acusticamente, infatti nel 2004 sono stati aggiunti dei pannelli Celenit fonoassorbenti (lana di legno di abete, mineralizzata e legata con cemento Portland).

Superficie pavimento	65.8 m^2
Altezza locale	4.47 m
Volume	294.1 m^3
N° di persone massimo	58
Densità di occupazione massima	1.19 m^2/persona
N° di persone presenti durante le misure di rumore di fondo	40 bambini
Densità di occupazione durante le misure	1.6 m^2/persona
N° di questionari compilati	37

Tab.4.1 - *Dati geometrici e occupazionali*

Fig. 4.2 - *Rivestimento fonoassorbente utilizzato in tutta la sala*

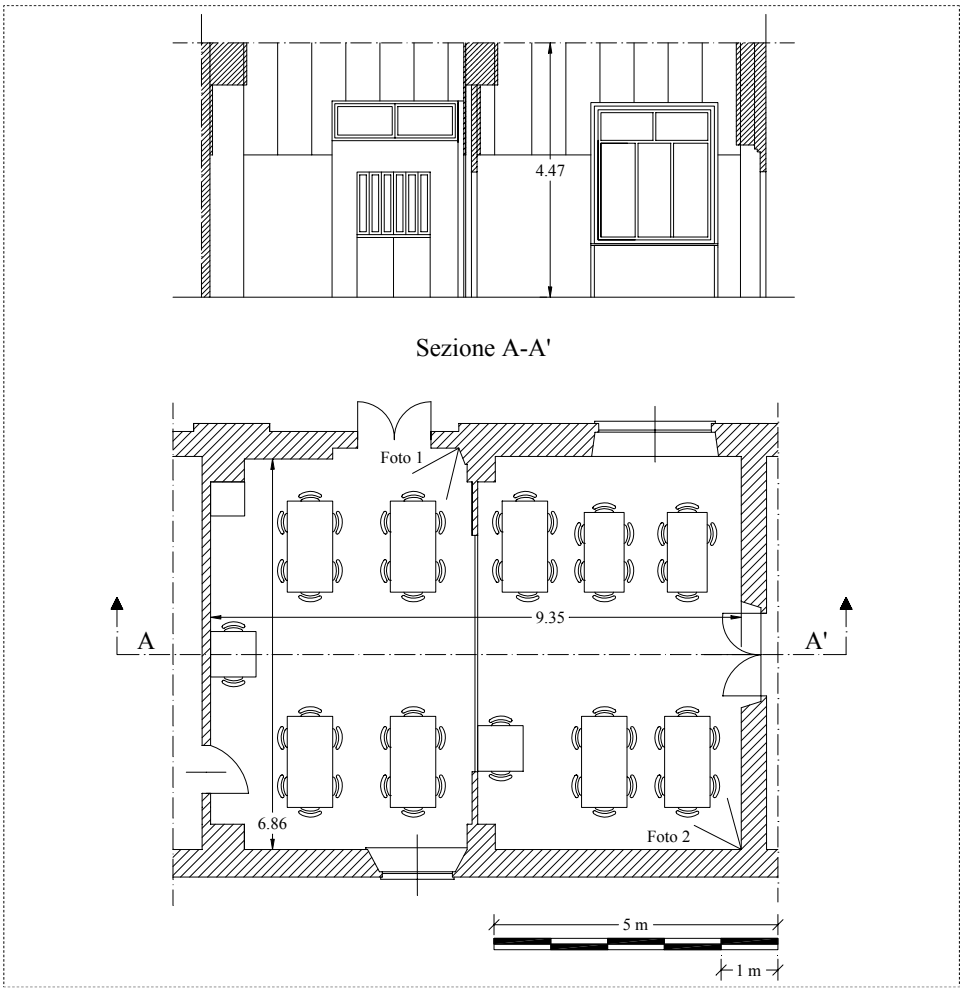


Fig. 4. 3 - *Planimetria e sezione della mensa oggetto di studio*

Fig. 4.4 - *Foto della mensa presa dal punto 1*

Fig. 4.5 - *Foto della mensa presa dal punto 2*

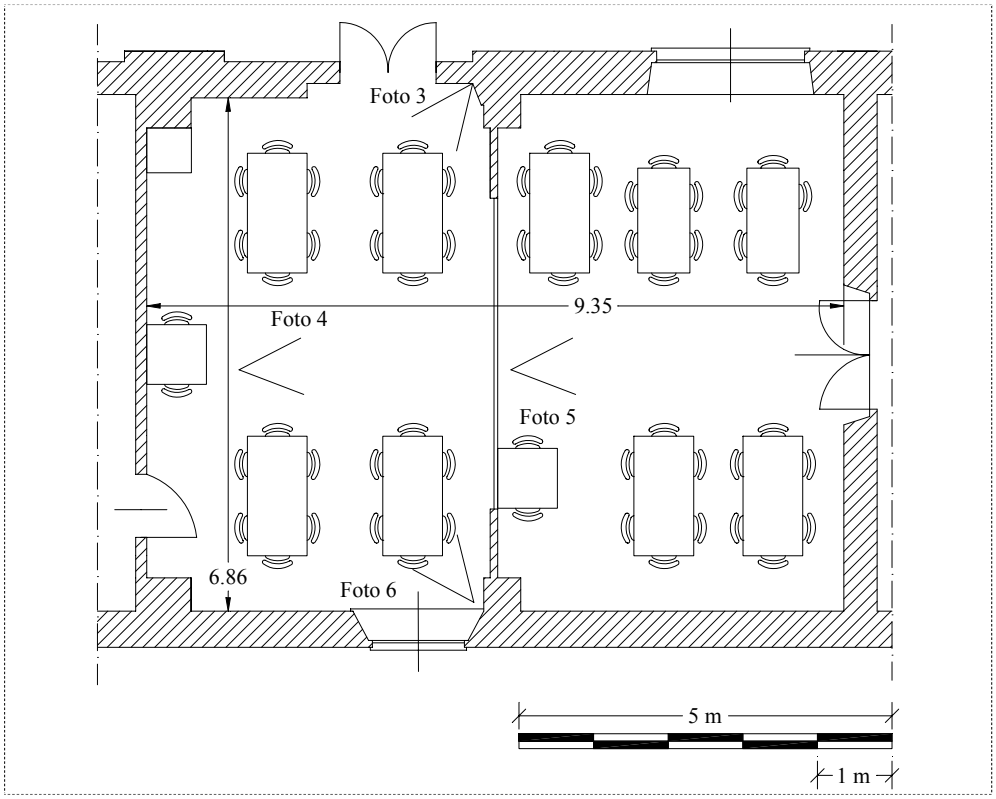


Fig. 4.6 - *Foto n° 3*

Fig. 4.7 - *Foto n° 4*

Fig. 4.8 - *Foto n° 5*

Fig. 4.9 - *Foto n° 6*

Scuola elementare "Pianea"

Viale IV novembre14, Livorno Ferraris (Vercelli)

In questo caso la mensa si trova nel piano interrato dove sono presenti solo locali di servizio. Le cucine sono presenti solo nella scuola di via Martiri della libertà e in questo complesso c'è solamente un'area adibita al riscaldamento dei piatti che qui arrivano. Le lezioni si svolgono nel piano superiore, interamente dedicato all'attività didattica.

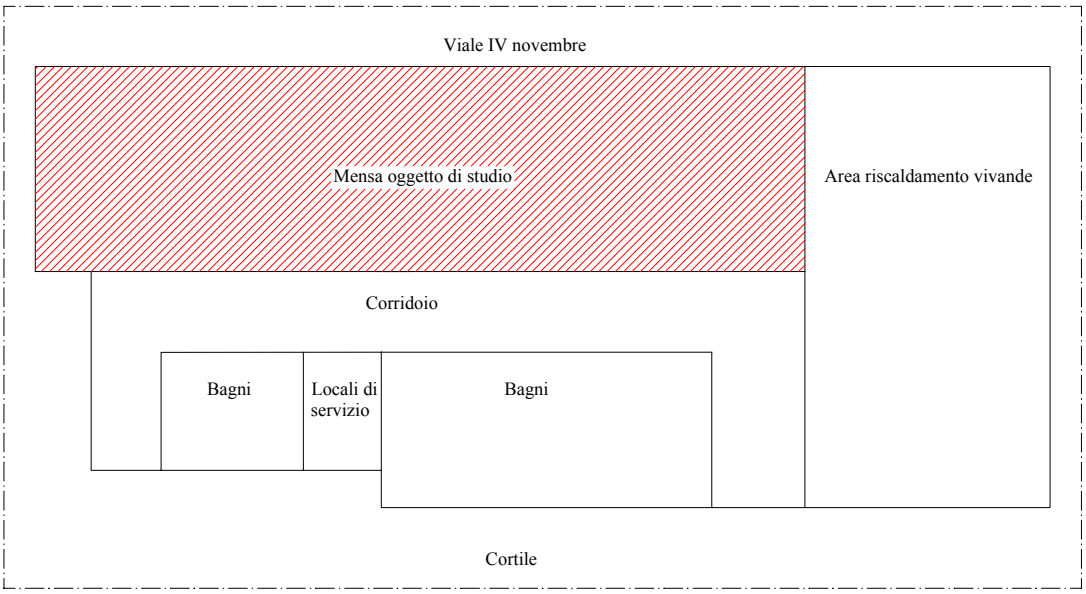


Fig. 4.10 - *Schema planimetrico di parte del complesso scolastico*

Superficie pavimento	145 m^2
Altezza locale	3 m
Volume	435.3 0 m^3
N° di persone massimo	88
Densità di occupazione massima	1.64 m^2/persona
N° di persone presenti durante le misure di rumore di fondo	42 bambini
Densità di occupazione durante le misure	3.5 m^2/persona
N° di questionari compilati	50

Tab. 4.2 - *Dati geometrici e di occupazione della sala al momento delle misure*

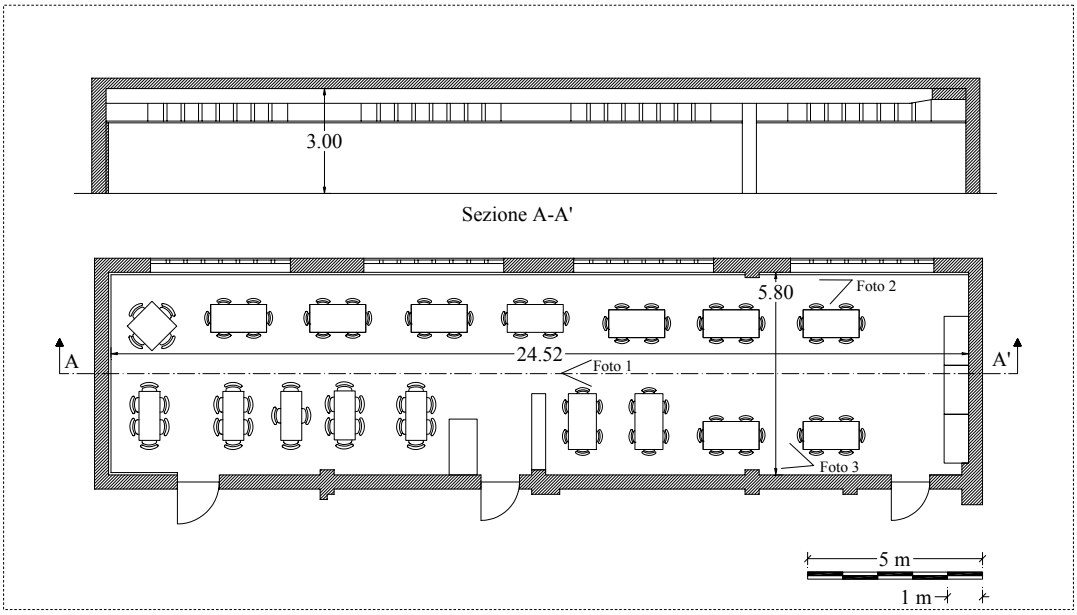


Fig. 4.11 - *Planimetria e sezione della mensa oggetto di studio*

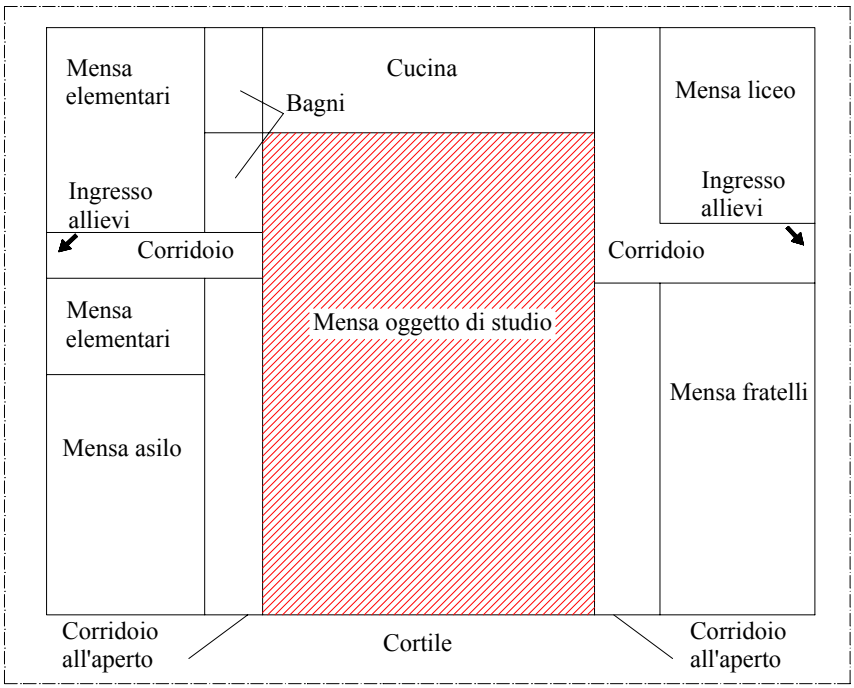
Fig. 4.12 - *Foto n° 1*

Fig. 4.13 - *Foto n° 2 e 3*

Scuola elementare "Collegio San Giuseppe "

Via San Francesco da Paola 23, Torino

Anche in questo caso la mensa si trova nel piano interrato, che è interamente occupato dai refettori dei fratelli dell'istituzione religiosa e da quelli delle varie istituzioni scolastiche (dall'asilo al liceo) che ospita questo complesso. Le cucine sono posizionate a fianco alla sala che ho preso in considerazione. Questa sala a differenza di tutte le altre, è di dimensioni non comparabili con quelle oggetto di studio e può contenere fino a duecento bambini. Le dimensioni sono certamente dovute ad una diversa condizione rispetto a quelle degli edifici di Livorno Ferraris che ospitano i bambini di un piccolo paese e ovviamente in numero estremamente ridotto rispetto ad una città come Torino.



Superficie pavimento	337 m^2
Altezza locale	3.60 m
Volume	1187 m^3
N° di persone massimo	264
Densità di occupazione massima	1.27 m^2/persona
N° di persone presenti durante le misure di rumore di fondo	129 bambini
Densità di occupazione durante le misure	2.6 m^2/persona
N° di questionari compilati	129

Tab. 4.3 - *Dati geometrici e di occupazione della sala al momento delle misure*

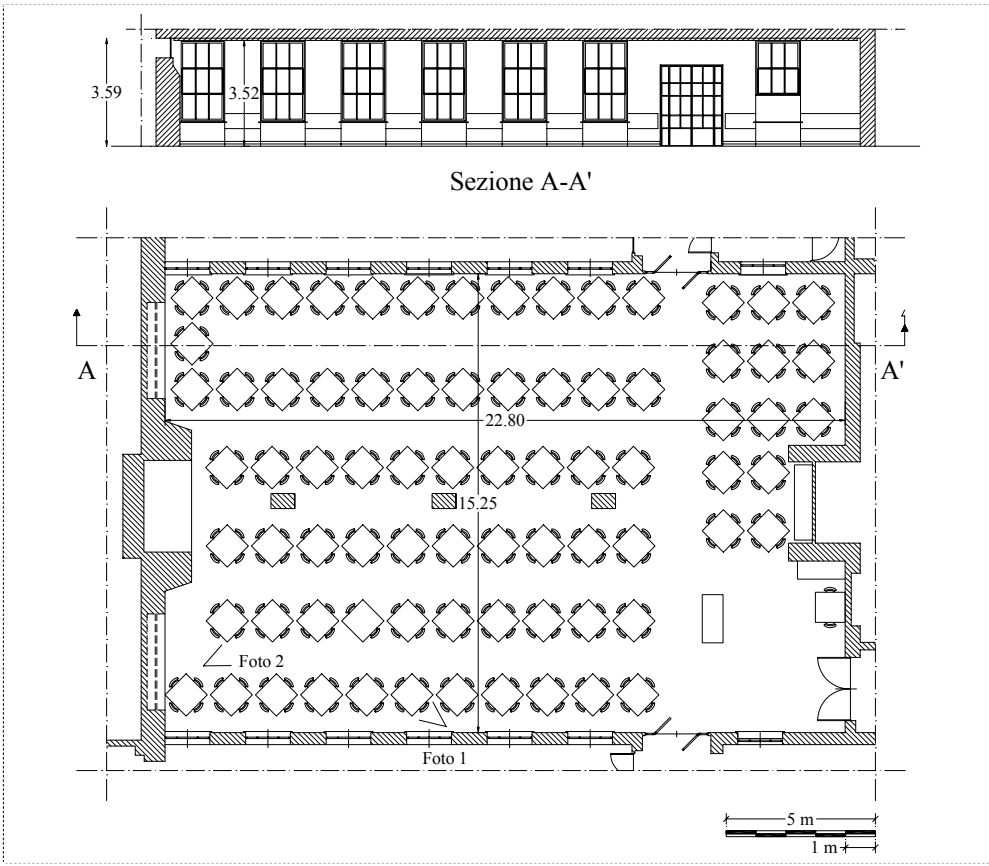


Fig. 4.15 -*Planimetrie e sezioni della mensa oggetto di studio*

Fig. 4.16 - *Foto n° 1*

Fig. 4.17 - *Foto n° 2*

Questa sala presenta alcune particolari caratteristiche: i muri sono interamente ricoperti di carta da parati, ha un controsoffitto a doghe in alluminio e ci sono grosse finestre inclinate lungo i lati maggiori dell'ambiente.

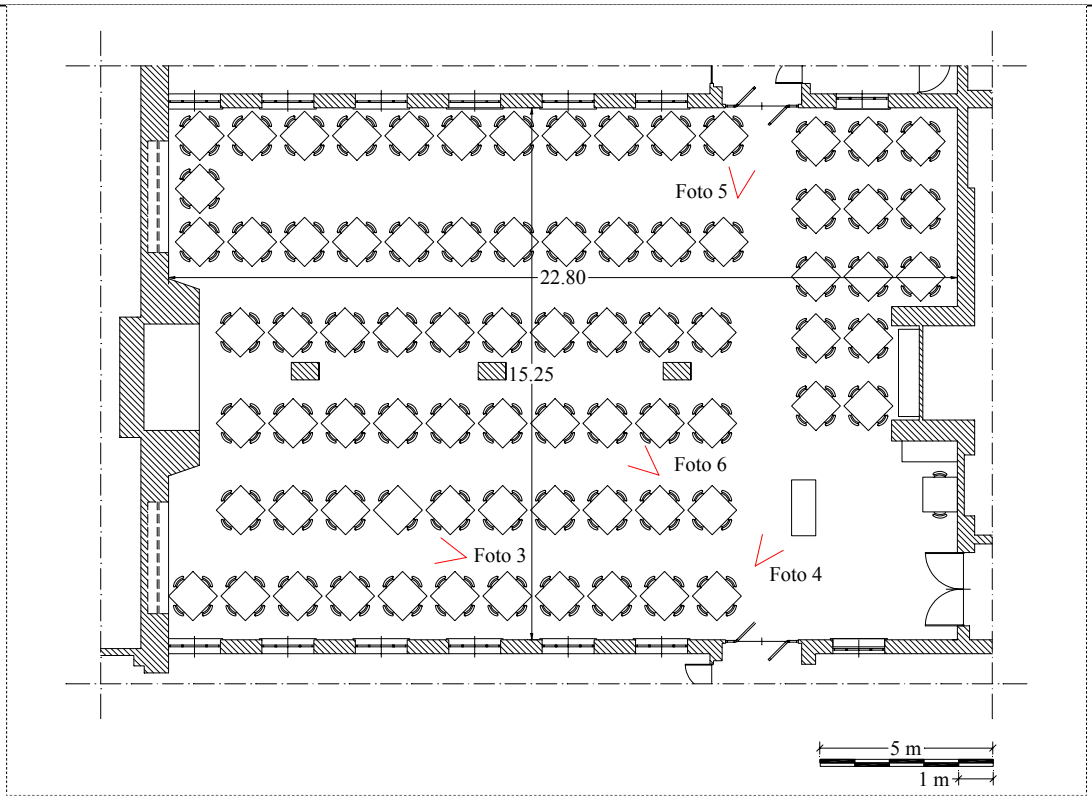


Fig. 4.18 - *Foto n°3*

Fig. 4.19 - *Foto n°4*

Fig. 4. 20 - *Foto n°5*

Fig. 4. 21 - *Foto n° 6*

La caratteristiche principali di queste sale sono state inserite nella tabella n° 4.4, in modo da avere un confronto immediato delle tre mense. Per ognuna di queste è stato calcolato il tempo di riverberazione che caratterizza acusticamente l'ambinente e che verrà poi utilizzato nelle parti successive del lavoro, soprattutto per quanto riguarda la parte di progetto.

Il calcolo del tempo di riverberazione e del fattore di assorbimento acustico medio dell'ambinete verrà inserito in modo più approfondito nel successivo capitolo, in tabella sono inseriti come descrizione acustica delle sale.

	Scuola elementare "Pianea"	Scuola elementare "Solaro"	Istituto "San Giuseppe"
Superficie pavimento	65.8 m^2	145 m^2	337 m^2
Altezza locale	4.47 m	3 m	3.60 m
Volume	294.1 m^3	435.3 m^3	1187 m^3
ΣS	422.8 m^2	617.5 m^2	1292.4 m^2
V/ ΣS	0.69 m	0.70 m	0.92 m
$a_{m\ (500\text{-}2000\ Hz,\ piena)}$	0.23 [-]	0.12 [-]	0.15 [-]
$T_{60\ (500\text{-}2000\ Hz,\ piena)}$	0.7 s	1.9 s	1.5 s
N°massimo di persone	58	88	264
Densità occupazione massima	1.19 m^2/persona	1.64 m^2/persona	1.27 m^2/persona
N° persone presenti durante le misure	40	42	129
Densità occupazione durante le misure	1.6 m^2/persona	3.5 m^2/persona	2.6 m^2/persona
N° questionari	37	44	129

Tab. 4.4*: Principali caratteristiche delle mense delle scuole oggetto di studio*

CAPITOLO 5

INDAGINI IN CAMPO

Lo studio svolto per la tesi si basa principalmente su indagini effettuate in campo e prevede la valutazione della qualità acustica delle tre diverse mense attraverso metodi soggettivi e oggettivi.

5.1 Indagini oggettive

Le indagini di tipo oggettivo comprendono tutto l'insieme di misure dei parametri che concorrono a soddisfare le esigenze di comfort acustico che, individuate nella buona ricezione e nell'assenza di disturbo, sono condizioni necessarie per assicurare sia una buona intelligibilità del parlato sia una situazione di benessere psico-fisico durante la permanenza nel locale destinato alla ristorazione.

Dato che sarebbe stato impossibile realizzare alcune misure con la presenza degli alunni, ho utilizzato dei pannelli di lana di vetro con un coefficiente di assorbimento del tutto analogo a quello dei bambini seduti.

Fig. 5.1 - *Pannelli di lana di vetro utilizzati per simulare la presenza dei bambini*

I pannelli scelti per lo svolgimento della tesi sono di lana di vetro, modello ISOVER E100 S di 1200 x 600 x 40 mm, con una densità di 50 kg/m^3. Il pannelli sono poi stati tagliati, in modo da avere dimensioni compatibili con quelle di un busto di bambino.

Assorbimento acustico [m^2]	Frequenze					
	125	250	500	1000	2000	4000
Bambino	0.17	0.24	0.26	0.29	0.33	0.33
Pannelli lana di vetro	0.22	0.31	0.30	0.27	0.22	0.25

Tab. 5.1 - *Assorbimento acustico di un bambino e dei pannelli utilizzati nelle misure (E. CIRILLO, Acustica applicata, Milano, Mc Graw-Hill , 1997)*

I pannelli, della dimensione di (600 x 300 x 40 mm), sono stati posizionati sulle sedie proprio a simulare la presenza dei bambini e hanno permesso di fare misure che non sarebbero state facili da realizzare.

Il materiale è stato scelto solo in base al coefficiente di assorbimento ma sarebbe stato meglio avere dei pannelli differenti. Questi, così allo stato grezzo, con l'uso nei tre giorni di misure, si sono disfatti in piccoli pezzi, costringendo a pulire con attenzione la sala, soprattutto in vista dell'arrivo dei bambini. Infatti, nonostante la lana di vetro non sia inserita dalla OMS (Organizzazione Mondiale della Sanità) tra le sostanze cancerogene, viene richiesta sempre una certa attenzione con tutti quei materiali che possono produrre residui inalabili come nel caso specifico di questi pannelli.

Fig. 5.2 - *Pannelli ISOVER E 100S utilizzati a simulare la presenza dei bambini*

5.1.1 Misura del tempo di riverberazione

Gli effetti del suono riverberato sulla qualità dell'ascolto possono essere valutati con la determinazione del tempo convenzionale di riverberazione, τ_{60}.

In fase di progettazione si può determinare il tempo di riverberazione mediante l'equazione di Sabine, individuata alla fine dell'Ottocento sulla base di osservazioni sperimentali:

$$\tau_{60} = 0.163 \frac{V}{A_{tot}} \qquad [\text{s}]$$

$$A_{tot} = \sum_{i=1}^{n} S_i a_i + \sum_{j=1}^{m} n_j A_j \qquad [\text{m}^2]$$

dove:

V [m^3] = volume della sala

S_i [m^2] = area dell'i-esima superficie

a_i [-] = coefficiente di assorbimento della superficie i-esima

A_j [m^2] = assorbimento di una unità del j-esimo tipo

n_j [-] = numero di unità del j-esimo tipo

La relazione di Sabine può essere usata per V < 10000 m^3 e $a_m < 0.3$

Dove a_m è il fattore di assorbimento acustico medio di un ambiente ed è dato dalla relazione:

$$a_m = \frac{\sum a_i S_i + \sum n_j A_j}{\sum S_i} \qquad [-]$$

La relazione di Sabine fornisce risultati inesatti per ambienti fortemente fonoassorbenti. Infatti per ($a_m \rightarrow 1$) da questa non si ottiene τ_{60} nullo. In questi casi si applica la relazione di Eyring:

$$\tau_{60} = 0.163 \frac{V}{\sum S_i \cdot \left|\ln(1 - a_m)\right|} \qquad [\text{s}]$$

per la quale se $(a_m \rightarrow 1)$ $\left|\ln(1-a_m)\right| \rightarrow \infty$ $\tau_{60} \rightarrow 0$

Il valore ottimale del tempo di riverberazione rappresenta il giusto compromesso tra il raggiungimento di un livello sonoro sufficiente per un'audizione senza sforzo, in tutti i punti dell'ambiente, e la riduzione del disturbo provocato da un eccesso di riverberazione.

Il valore ottimale del tempo convenzionale di riverberazione si può desumere, rispettivamente per le frequenze di 500 e 1000 Hz, dalle seguenti formule empiriche:

$$\tau_{ott,500} = 0.5 + 10^{-4} V \qquad [s]$$

$$\tau_{ott,1000} = k\sqrt[9]{V} \qquad [s]$$

dove k può variare tra 0.3 e 0.4

In letteratura sono riportati diagrammi che consentono la determinazione del tempo di riverberazione ottimale in funzione del volume dell'ambiente e della sua destinazione d'uso e forniscono tali valori in funzione della frequenza.

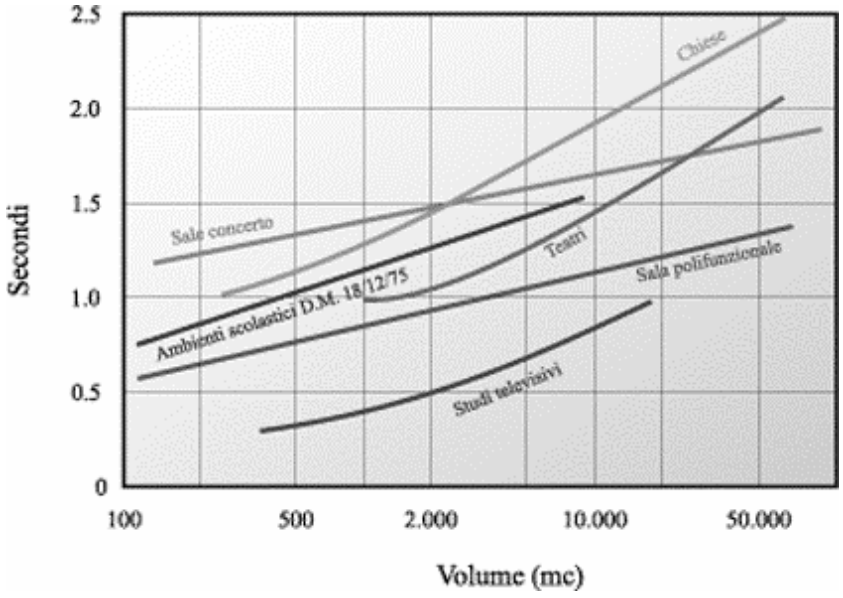


Fig. 5.3 - *Valori ottimali del tempo di riverberazione in funzione del volume e della tipologia a 1000 Hz*

In base a ciò è stato calcolato il tempo di riverberazione di ognuna delle tre sale. Nelle tabelle seguenti è indicato l'assorbimento totale delle mense e i risultati dei rispettivi tempi di riverberazione. I coefficienti di assorbimento utilizzati nei calcoli sono stati

acquisiti da un prontuario in consultazione presso il LA.M.S.A (Laboratorio di Analisi e Modellazione dei Sistemi Ambientali) al Castello del Valentino.

Scuola	*Volume [m3]*	**Atot**					
		Frequenze					
		125	250	500	1000	2000	4000
Solaro	294,1	22,83	36,33	60,08	76,93	101,19	95,29
Pianea	435,3	35,30	36,53	36,68	40,01	53,96	75,13
San Giseppe	1187	84,96	104,26	118,02	146,52	146,17	159,34
Tempo di riverberazione calcolato [s]							
T60	Scuola	*Frequenze*					
		125	250	500	1000	2000	4000
$\tau_{60} = 0.163 \frac{V}{A_{tot}}$	Solaro	2,2	1,4	0,8	0,6	0,5	0,5
	Pianea	2,0	1,9	1,9	1,8	1,3	0,9
	San Giseppe	3,1	2,2	1,6	1,4	1,2	0,9

Tab. 5.2 -*Tempi di riverberazioni calcolati con la formula di* Sabin*e*

Le misure del tempo di riverberazione possono essere effettuate con diversi tipi di strumentazione e con diverse metodologie. Il primo metodo utilizzato storicamente prevede l'introduzione di una sorgente sonora in condizioni di regime stazionario, come Sabine descrisse ad inizio del secolo scorso.

Così come fu descritto da Sabine, il tempo di riverberazione richiede di misurare il tempo che intercorre dallo spegnimento di una sorgente sonora stazionaria, in condizioni di regime, fino ad ottenere un decadimento dell'energia sonora presente in ambiente pari a 60 dB. In genere non è possibile ricavare il tempo di riverberazione da questa definizione, poiché non si riesce a registrare un decadimento di 60 dB dato che spesso è presente un rumore di fondo troppo elevato: si ricorre allora ad una estrapolazione della prima parte della curva di decadimento. Esistono numerose possibilità di estrapolazione del tempo di riverberazione in base alla lunghezza del tratto di decadimento che si vuole considerare ma l'intervallo più comunemente impiegato è compreso tra – 5 dB e –35 dB sotto il livello di regime, tralasciando i primi 5 dB dove è più facile che ci siano anomalie nel decadimento: in questo caso il tempo di riverberazione viene indicato come T_{30}. Il tempo di riverberazione viene estrapolato anche in porzioni ridotte: il T_{10} e il T_{20} sono misurati su intervalli rispettivamente di 10 e 20 dB. In ogni caso tutti i valori ottenuti sono sempre riferiti ad un decadimento complessivo pari a 60 dB.

In alternativa alla sorgente che produce un campo sonoro stazionario e diffuso e interrotta improvvisamente, può essere utilizzata una sorgente sonora di tipo impulsivo quale un colpo di pistola, lo scoppio di un palloncino o un impulso inviato da un altoparlante. Con questa soluzione il tempo di riverberazione può essere ottenuto a partire dalla risposta all'impulso: in particolar modo viene ricostruita la curva di decadimento che sarebbe stata prodotta da una sorgente in funzionamento continuo (integrazione all'indietro di Schroeder).

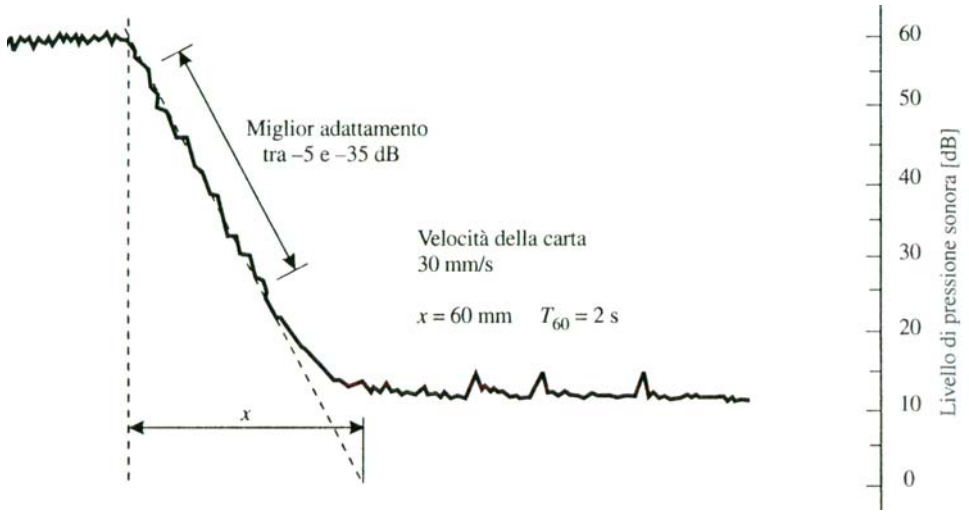


Fig. 5.4 - *Determinazione del tempo di riverberazione dal rilievo del transitorio di estinzione del suono*

Per questo studio le misure del tempo di riverberazione sono state realizzate attraverso il metodo della risposta all'impulso generato da un colpo di pistola. Il tempo di riverberazione è stato misurato in assenza dei bambini ma con i pannelli di lana di vetro in modo da simulare la condizione di sala piena. Per questi locali, il calcolo è stato effettuato con una media dei tempi dovuti a più misure effettuate consecutivamente.

Data la particolarità della tipologia dei locali e riguardando solo l'ascolto della parola, assumiamo come valore ottimale del tempo di riverberazione per tutte le frequenze intorno a 0.5 s

Di seguito sono riportati i dati rilevati nelle tre diverse mense:

SCUOLA ELEMENTARE "SOLARO"

Superficie pavimento [m^2]	65.8
Altezza sala [m]	4.47
Volume della sala [m^3]	294.1
N° persone massimo	58
Densità max [m^2/persona]	1.19

Tempo di riverberazione [s]	***Frequenze***					
	125	250	500	1000	2000	4000
Colpo di pistola 1	2,27	1,38	0,66	0,62	0,61	0,5
Colpo di pistola 2	2,03	1,31	0,72	0,62	0,63	0,47
Colpo di pistola 3	2,08	1,3	0,8	0,62	0,69	0,52
Media	**2,13**	**1,33**	**0,73**	**0,62**	**0,64**	**0,5**

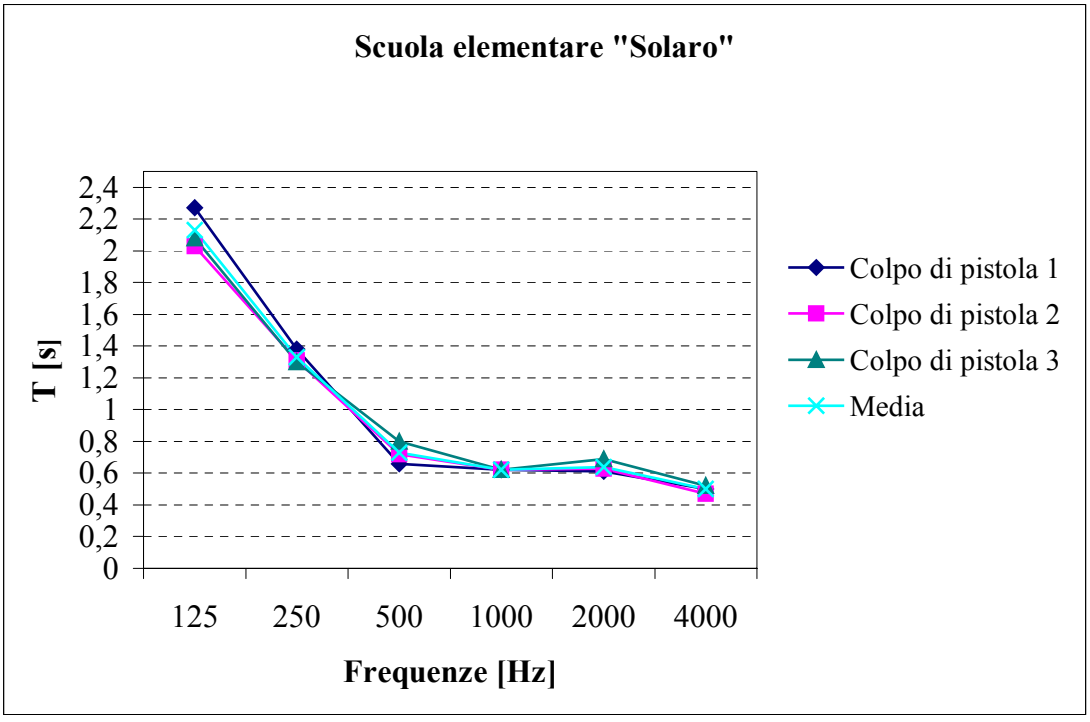


Fig. 5.5 - *Grafico dell'andamento dei tempi di riverberazione*

SCUOLA ELEMENTARE "PIANEA"

Superficie pavimento [m^2]	145
Altezza sala [m]	3
Volume della sala [m^3]	435.30
N° persone massimo	88
Densità max [m^2/persona]	1.64

Tempo di riverberazione [s]	**Frequenze**					
	125	250	500	1000	2000	4000
Colpo di pistola 1	1,86	2,06	2,07	1,9	1,57	0,91
Colpo di pistola 2	2,17	2,02	2,21	2,01	1,57	0,95
Colpo di pistola 3	2,14	1,85	2,15	1,99	1,56	0,9
Media	**2,06**	**1,98**	**2,14**	**1,97**	**1,57**	**0,9**

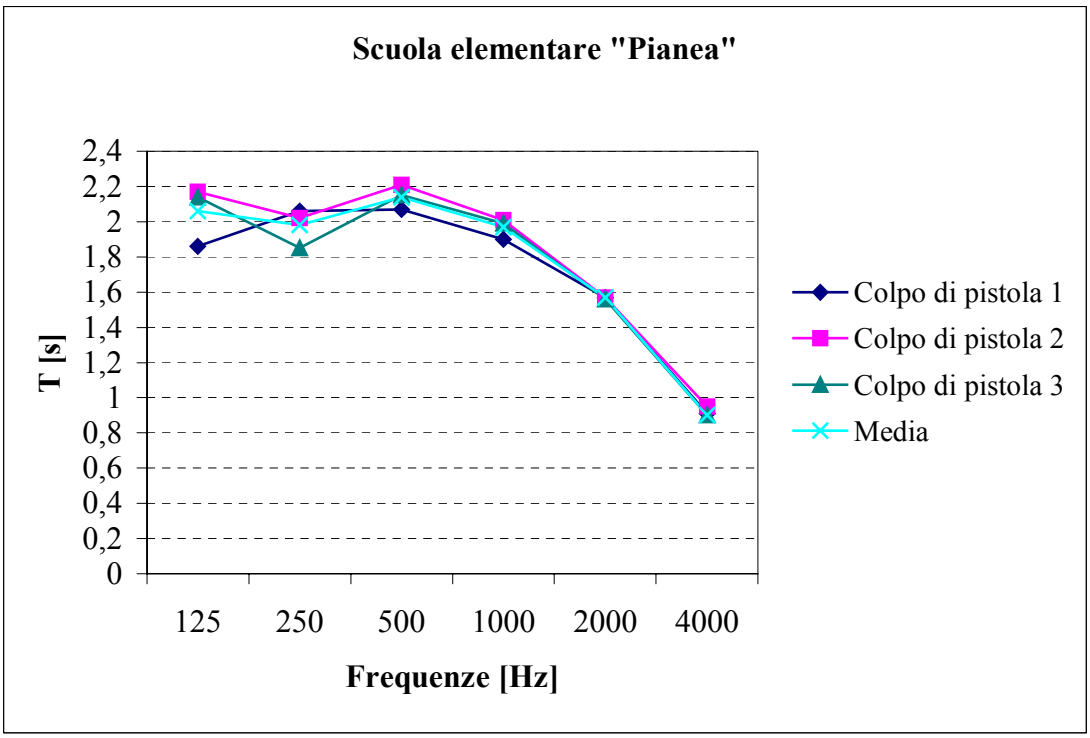


Fig. 5.6 - *Grafico dell'andamento dei tempi di riverberazione*

SCUOLA ELEMENTARE "ISTITUTO SAN GIUSEPPE"

Superficie pavimento [m^2]	337
Altezza sala [m]	3.60
Volume della sala [m^3]	1187
N° persone massimo	264
Densità max [m^2/persona]	1.27

Tempo di riverberazione [s]	**Frequenze**					
	125	250	500	1000	2000	4000
Colpo di pistola 1	3,07	2,03	1,62	1,46	1,3	0,91
Colpo di pistola 2	3,08	1,96	1,58	1,43	1,39	0,95
Colpo di pistola 3	2,95	2,29	1,57	1,41	1,34	0,9
Colpo di pistola 4	2,97	1,96	1,53	1,53	1,27	0,9
Media	**3,02**	**2,06**	**1,58**	**1,46**	**1,33**	**0,92**

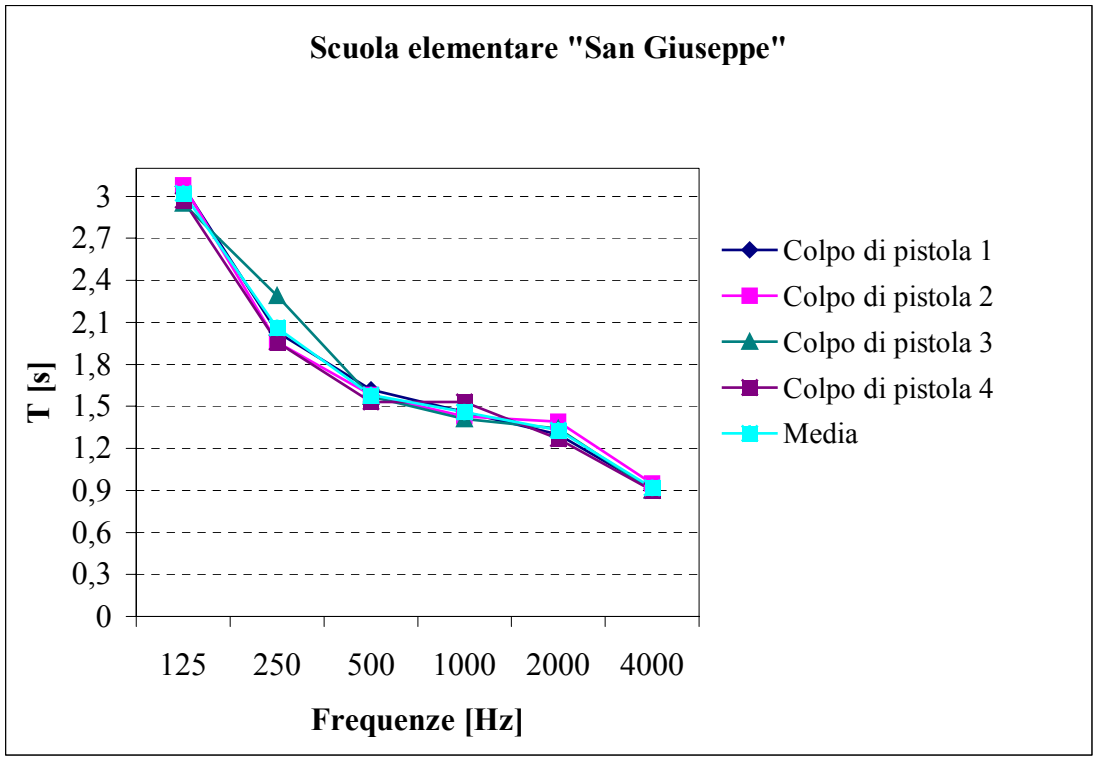


Fig. 5.7 - *Grafico dell'andamento dei tempi di riverberazione*

Osservando i tempi di riverberazione delle tre diverse mense, si nota come i valori siano piuttosto alti superando in media il secondo. Gli unici valori che possono ritenersi soddisfacenti, nelle frequenze di 500, 1000 e 2000Hz, sono quelli misurati nella scuola "Solaro", a dimostrazione anche del fatto che il trattamento acustico realizzato sia ben riuscito.

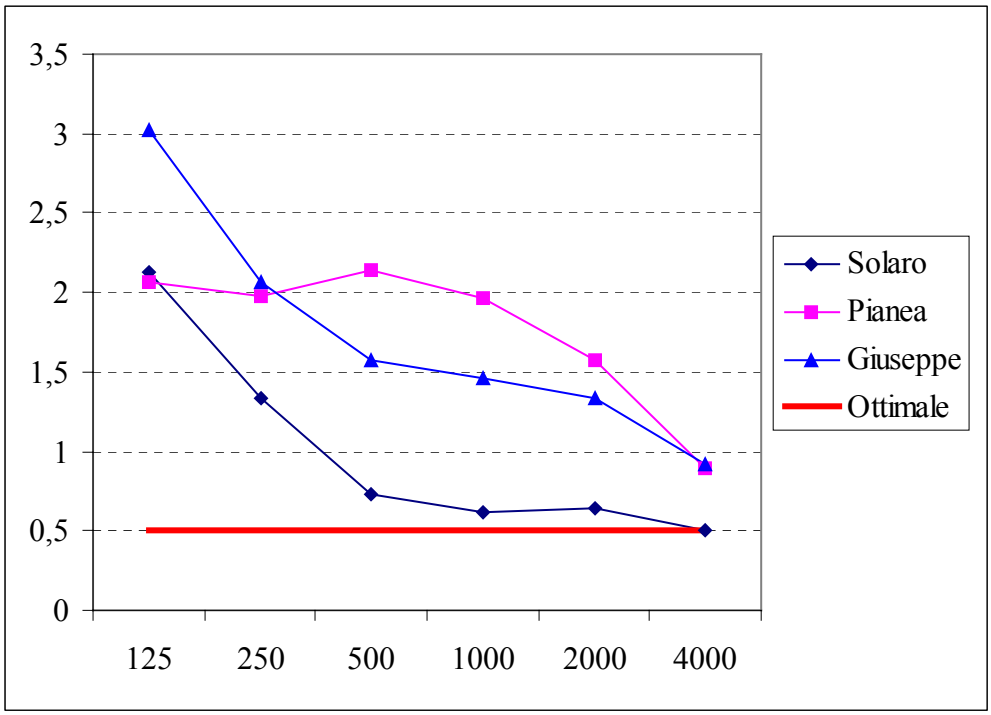


Fig. 5.8 - *Confronto dei tempi di riverberazione misurati con il valore ottimale*

I valori molto elevati della mensa dell'Istituto San Giuseppe di quella della scuola Pianea a Livorno Ferraris, sono collegati principalmente al valore del volume degli ambienti: di fatto il tempo di riverberazione è inversamente proporzionale all'assorbimento totale, e direttamente proporzionale al volume dell'ambiente.

5.1.2 Misure del rumore di fondo

L'assenza di disturbo è un requisito indispensabile per ottenere una buona qualità acustica in un ambiente, inoltre, la presenza di un eccessivo rumore di fondo incide particolarmente sull'intelligibilità della parola.

Come ho già spiegato in altre parti della tesi, l'indice di valutazione del disturbo da rumore è il livello sonoro continuo equivalente $L_{Aeq,T}$, indice sintetico della composizione in frequenza e dell'andamento temporale del fenomeno acustico.

Il livello sonoro continuo equivalente è il livello sonoro di un ipotetico rumore costante che, se sostituito al rumore reale, variabile nel tempo, comporta la stessa quantità di

energia sonora. Lo scopo dell'introduzione del L_{Aeq} è quello di poter caratterizzare con un unico valore un rumore di livello sonoro variabile, su di un intervallo di tempo prefissato. La sua espressione, adottando la ponderazione A, è la seguente:

$$L_{Aeq,T} = 10\log\left[\frac{1}{T}\cdot\int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2}dt\right] \qquad [\text{dB(A)}]$$

dove:

- p_a è il valore istantaneo della pressione sonora ponderata secondo la curva A;
- p_0 è la pressione di riferimento, assunta pari a $2\cdot10^{-5}$ Pa, corrispondente alla soglia di udibilità a 1000 Hz;
- T è l'intervallo di tempo di integrazione.

Il livello continuo equivalente non fornisce però alcuna indicazione relativamente alla variazione nel tempo del livello sonoro del fenomeno. Se necessaria allo studio esiste una metodologia di analisi di tipo statistico che permette di ottenere indicazioni sulla distribuzione e variazione temporale del fenomeno e che fornisce i cosiddetti livelli statistici (o percentili) utili proprio a descrivere rumori fluttuanti nel tempo.

Le misure dei livelli del rumore di fondo sono state effettuate nelle mense oggetto di studio nella condizione di sala effettivamente occupata dai clienti (ho rimosso i pannelli di lana di vetro che servivano solo durante le misure del tempo di riverberazione per simulare l'assorbimento dei bambini).

Per ottenere dei livelli di rumore di fondo rappresentativi di una quotidiana pausa per pranzo all'interno delle mense, le misure sono state effettuate senza avvertire i bambini in alcun modo e sono state realizzate in un arco di tempo compreso tra i 20 e i 30 minuti. I dati sono stati registrati solamente una volta per mensa e in tutti e tre i casi si è verificata la condizione di massima occupazione della sala.

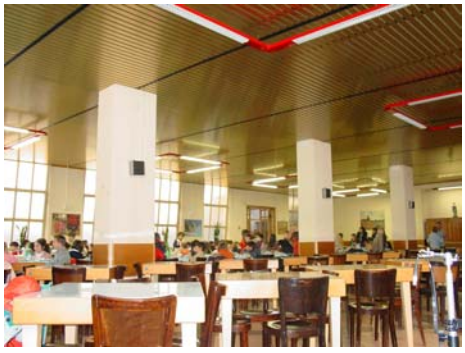


Fig. 5.9 - *Misure del rumore di fondo all'Istituto San Giusepe*

Di seguito sono riportati i dati rilevati nelle tre diverse mense, come valori globali.

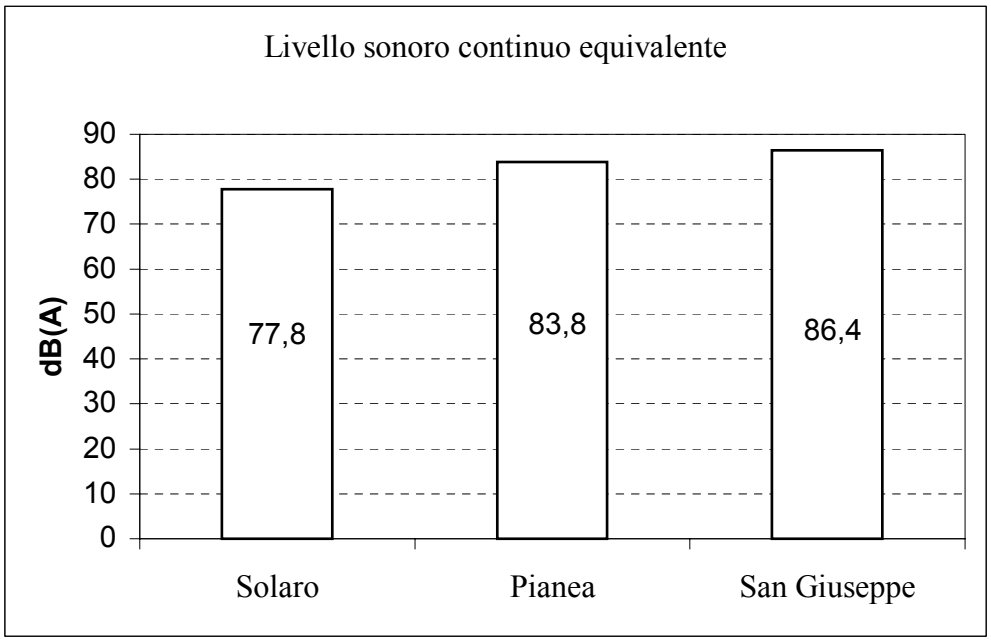


Fig. 5.10 - *Livello del rumore di fondo misurato nelle tre mense durante l'ora del pranzo*

Si può notare facilmente con la lettura del grafico, che in tutte e tre le scuole si raggiungono livelli di rumore molto elevati. La mensa dell'Istituto San Giuseppe tocca i livelli più alti ma è probabilmente è da attribuire ad un ambiente maggiormente riverberante e al numero maggiore di bambini presenti rispetto alle altre scuole.
Queste misure sono fondamentali per la successiva parte di calcolo, cioè quella dello valutazione dell'intelligibilità della parola e la definizione dell'indice STI (che tratterò con maggiore dettaglio nel prossimo capitolo) nonché per la stima del livello personale di esposizione, indice base della normativa italiana per la valutazione del rischio da rumore.

5.1.3 Il calcolo del L_{ep}

Il decreto legge 277/1991 definisce l'obbligo per il datore di lavoro di effettuare la valutazione dell'esposizione a rumore a ciascun addetto, ed è in base ai risultati di tale valutazione di adempiere ad una serie di incombenze di natura tecnica, procedurale e sanitaria.
La soglia minima di intervanto è rappresentata dal valore di 80 dB(A), al superamento della quale i lavoratori devono essere informati sui rischi derivanti dall'esposizione al rumore, sulle misure di protezione cui conformarsi.

Per i livelli superiori scattano ulteriori obblighi di fornitura dei mezzi individuali di protezione, di formazione degli addetti sull'uso corretto degli stessi protettori nonché delle macchine e delle apparecchiature, di sorveglianza sanitaria ai lavoratori esposti, di perimetrazione e segnalazione dei luoghi, di riduzione del rumore al fine di limitare l'esposizione dei lavoratori, di registrazione e comunicazione dei nominativi dei lavoratori esposti.
Ricordando che il livello di esposizione personale quotidiana si ricava dalla relazione:

$$L_{EP,d} = L_{Aeq,T} + 10\log\frac{T_e}{T_0}$$

I valori calcolati per le tre mense oggetto di studio sono:

Scuole	$L_{EP,d}$ *[dB(A)]*
Solaro	68,8
Pianea	74,8
San Giuseppe	77,4

Tab. 5.3 - *Livelli di esposizione personale quotidiana nei tre casi studio*

I calcoli sono stati realizzati partendo dal presupposto che i lavoratori fossero esposti per otto ore al livello sonoro rilevato durante l'ora del pranzo. I valori non superano in nessuno dei tre casi la soglia minima di intervento di 80 dB(A).
Indipendentemente dal risultato della valutazione dell'esposizione al rumore, sono assegnati al datore di lavoro alcuni obblighi: innanzitutto deve permettere ai lavoratori di verificare l'applicazione delle misure di tutela predisposte e deve disporre ed esigere l'osservanza, da parte dei singoli lavoratori, delle disposizioni aziendali delle norme.
Qualunque sia poi il livello di esposizione, il datore di lavoro deve ridurre al minimo, in relazione alle conoscenze acquisite in base al progresso tecnico, i rischi derivanti dall'esposizione al rumore mediante misure tecniche, organizzative e procedurali, concretamente attuabili, privilegiando gli interventi alla fonte. Ciò implica l'adozione di misure quali la diminuzione di esposizione, diversa organizzazione temporale delle

lavorazioni in modo da produrre rumore quando è coinvolto il minor numero di addetti e turnazione dei lavoratori nelle mansioni più rumorose.

La valutazione di questo indice stata presa in considerazione perché durante le misure ci si è resi conto degli effettivi livelli sonori presenti in mensa e si è pensato alla salute non solo degli studenti ma anche di chi vi lavora. Troppo poco si pensa all'importanza dell'acustica di questi ambienti dove questo fattore forse non è tra i più evidenti: però si va contro agli interessi di chi fruirà di queste sale, arrecando loro un danno che andrà ad incidere sulla salute di tutti, grandi e bambini e sulla formazione educazione di quest' ultimi.

5.2 Indagini soggettive

Trattandosi dello studio del comfort acustico di una mensa per bambini in età scolare, l'obiettivo è quello di capire quali siano le sensazioni soggettive di chi, come loro, utilizza quotidianamente queste sale. L'idea è stata quella di accostare a misure oggettive, come quelle del tempo di riverberazione o di indici di intelligibilità come lo STI (che tratterò in seguito), dei giudizi di tipo soggettivo che possano completare in modo corretto uno studio che altrimenti non terrebbe in considerazione tutti quei fattori personali che invece investono pesantemente la sfera del comfort ambientale.

5.2.1 Il questionario

Trattandosi di bambini è stato necessario realizzare dei questionari che avessero un livello di linguaggio adeguato all'età e che contenessero tutte quelle informazioni necessarie a capire il grado di intelligibilità e di privacy ai singoli tavoli che sono fenomeni che i bambini non conoscono e difficilmente capiscono.

Sono stati creati due diversi tipi di questionari da somministrate in base all'età dei soggetti. Un primo tipo è dedicato ai bambini che frequentano i primi tre anni delle scuole elementari e quindi di circa 6, 7 e 8 anni; il secondo tipo è invece stato realizzato per bambini delle classi quarta e quinta, di 9 e 10 anni. I test sono stati differenziati per far fronte alla diversa capacità dei bambini di idealizzare le situazioni: più sono grandi più riescono a capire situazioni complesse e delicate come sensazioni di comfort, al contrario più sono piccoli meno riescono a decifrare casi che vanno altre a sensazioni primarie. In ognuno dei casi però non sono state poste troppe domande ai fini di non rubare loro molto tempo e di non creare confusione con troppi concetti.

Dato che non è stato possibile somministrare di persona i questionari agli alunni e quindi spiegare loro come rispondere alle domande (lo hanno fatto gli insegnanti in aula), ho pensato di creare dei test che toccassero immediatamente la loro immaginazione. Ho realizzato allora una copertina che presentasse immediatamente il momento a cui i bambini dovevano prestare attenzione, cioè l'ora del pranzo (con l'immagine di due pupazzi che stanno mangiando) e poi ho inserito in tutte le altre pagine delle immagini che ricordassero ai bambini di ciò che si stava parlando: per esempio alla domanda "Quanti anni hai?" ho affiancato un disegno che rappresentava un gattino che soffiava sulle candeline di una torta. Con lo stesso scopo di facilitare le risposte, ogni risposta multipla era accompagnata da una immagine di una faccina che rappresentasse un particolare stato d'animo.

Il questionario è suddiviso il più parti anche per concentrare il teste su un solo obiettivo e le domande richiedono semplicemente una risposta articolata o in cinque punti (da "molto bene" a "niente") o in due ("si", oppure "no"); solo l'ultima parte differenziata rispetto alla fascia d'età.

Una prima parte dei test è destinata a raccogliere informazioni generali: ai bambini è chiesto di specificare il sesso, l'età, la classe che frequentano.

Con la seconda carrellata di domande ho voluto recuperare informazioni inerenti il comfort acustico: ai bambini viene chiesto in che misura riescono a percepire la conversazione dei compagni al proprio tavolo e in che misura invece riescono a percepire le conversazioni ai tavoli vicini. In questa fase ho inserito anche una domanda per verificare con più precisione il loro giudizio sull'intelligibilità del parlato ed infatti ho chiesto loro: "Se la tua maestra parla e cammina all'interno della mensa, riesci a sentire quello che dice?". Questo quesito sottolinea il concetto di intelligibilità non solo legata alle conversazioni che si hanno al proprio tavolo ma prende anche in considerazione l'intero ambiente acustico della mensa.

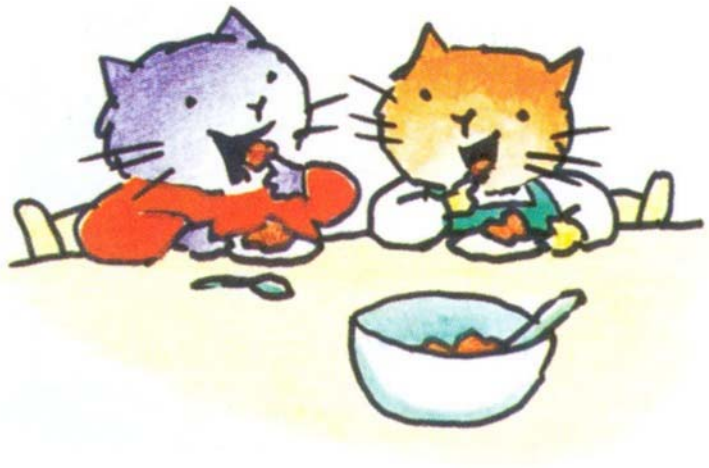
Nella terza parte del test, i quesiti sono invece volti a capire gli effetti del rumore sul comportamento dei bambini. Dopo aver chiesto se il rumore che c'è nella mensa desse loro molto fastidio, ho provato ad elencare alcune sensazioni che in genere gli specialisti associano agli effetti del rumore: ho domandato se dopo l'ora del pranzo fossero tranquilli, oppure distratti, se facessero fatica a seguire le lezioni o se fossero arrabbiati o ancora se non avessero nessuna conseguenza.

Quest'ultima parte è quella che, come ho già accennato prima, ho differenziato di più tra le fasce d'età. Ai bambini più piccoli ho chiesto solo una risposta semplice, cioè di

dire, per esempio, se ci fosse troppo rumore o no. Ai bambini un po' più grandi invece ho domandato anche di spiegare le loro sensazioni.

Test consegnato alla I, II, III elementare

SENTI BENE NELLA TUA MENSA?



Per favore, mi aiuti?

Rispondi alle domande che leggerai in questi fogli?

Grazie!

MI DICI QUALCHE COSA DI TE?

Sei un maschio o una femmina?

□ Maschio

□ Femmina

Quanti anni hai?

……

Che classe fai?

……

Leggi le domande e metti una X nella casella che preferisci

Facciamo un esempio:

Molto bene	Bene	Abbastanza	Poco	Niente
		X		

.....

1. Quando sei nella mensa della tua scuola, riesci a sentire le parole dei tuoi compagni seduti al tuo stesso tavolo?

Molto bene	Bene	Abbastanza	Poco	Niente

2. Quando sei nella mensa della tua scuola, riesci a sentire le parole dei tuoi compagni seduti nei tavoli vicino al tuo?

Molto bene	Bene	Abbastanza	Poco	Niente

3. Il rumore che c'è nella mensa della tua scuola, ti dà fastidio?

Moltissimo	Molto	Abbastanza	Poco	Niente

4. Se la tua maestra parla e cammina all'interno della mensa, riesci a sentire quello che dice?

Molto bene	Bene	Abbastanza	Poco	Niente

Leggi queste domande e metti una X sulla risposta che preferisci

5. In mensa c'è troppo rumore?

   □ Si

   □ No

6. Quando esci dalla mensa, come ti senti?

   - sei tranquillo ?

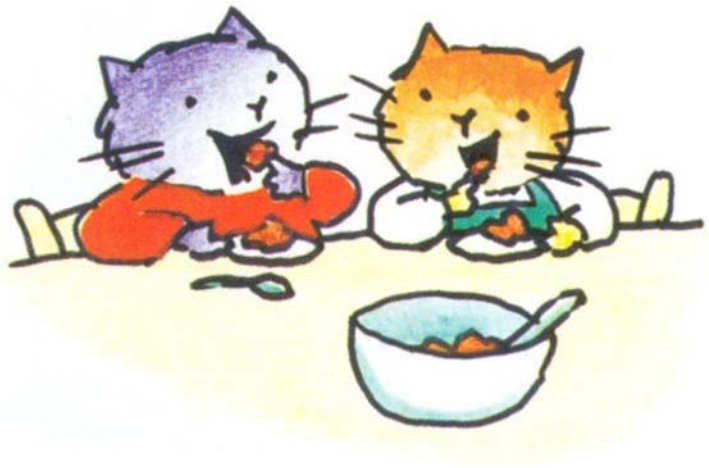
     □ Si

     □ No

- sei distratto?
  - □ Si
  - □ No
- fai fatica ad ascoltare la maestra che spiega la lezione?
  - □ Si
  - □ No
- sei arrabbiato?
  - □ Si
  - □ No
- stai come prima?
  - □ Si
  - □ No

Test consegnato alla IV e V elementare

SENTI BENE NELLA TUA MENSA?



Per favore, mi aiuti?

Rispondi alle domande che leggerai in questi fogli?

Grazie!

MI DICI QUALCHE COSA DI TE?

Sei un maschio o una femmina?

□ Maschio

□ Femmina

Quanti anni hai?

……

Che classe fai?

……

Leggi le domande e metti una X nella casella che preferisci

Facciamo un esempio:

Molto bene	Bene	Abbastanza	Poco	Niente
		X		

.....

1. Quando sei nella mensa della tua scuola, riesci a sentire le parole dei tuoi compagni seduti al tuo stesso tavolo?

Molto bene	Bene	Abbastanza	Poco	Niente

2. Quando sei nella mensa della tua scuola, riesci a sentire le parole dei tuoi compagni seduti nei tavoli vicino al tuo?

Molto bene	Bene	Abbastanza	Poco	Niente

3. Il rumore che c'è nella mensa della tua scuola, ti dà fastidio?

Moltissimo	Molto	Abbastanza	Poco	Niente

4. Se la tua maestra parla e cammina all'interno della mensa, riesci a sentire quello che dice?

Molto bene	Bene	Abbastanza	Poco	Niente

Leggi queste domande e metti una X sulla risposta che preferisci

5. In mensa c'è troppo rumore?

   □ Si

   □ No

6. Quando esci dalla mensa, come ti senti?

   - Sei tranquillo ?

     □ Si

     □ No

- Sei distratto?
  - □ Si
  - □ No

Se sì, perché?

……

- Fai fatica ad ascoltare la maestra che spiega la lezione?
  - □ Si
  - □ No

Se Sì, perché?

……

- Sei arrabbiato?
  - □ Si
  - □ No

Se Sì, perché?

……

- Stai come prima?
  - □ Si
  - □ No

5.2.2 Risultati delle indagini soggettive

Le informazioni di carattere generale servono ad individuare semplicemente il sesso e la fascia d'età dei bambini che frequentano la mensa.

La distinzione di sesso è importante perché i bambini hanno dimostrato di tollerare molto meglio il rumore rispetto alle loro compagne. Anzi, in occasione delle misure realizzate all'istituto San Giuseppe ho notato due bambine che cercavano in ogni modo di tapparsi le orecchie probabilmente nel tentativo di sottrarsi al gran rumore presente in sala. Al contrario i compagni maschi non sembravano minimamente turbati e hanno continuato a mangiare e inevitabilmente ad urlare.

Informazioni di carattere generale						
Scuola	*Questionari compilati n°*	*Sesso*		*Classe*		*Età media (anni)*
Solaro	37	Maschi	51,4%	I	47.4 %	6,6
				II	55.5 %	
		Femmine	49,6%	I	52.6%	
				II	44.5 %	
Pianea	50	Maschi	52%	III	52,9%	9,5
				IV	53,8%	
				V	47,6%	
		Femmine	48%	III	47,1%	
				IV	46,2%	
				V	52,4%	
San Giuseppe	129	Maschi	61.2%	I	63,4%	9,1
				II	65,2%	
				III	54,8%	
		Femmine	38,8%	I	36,60%	
				II	34,80%	
				III	45,20%	

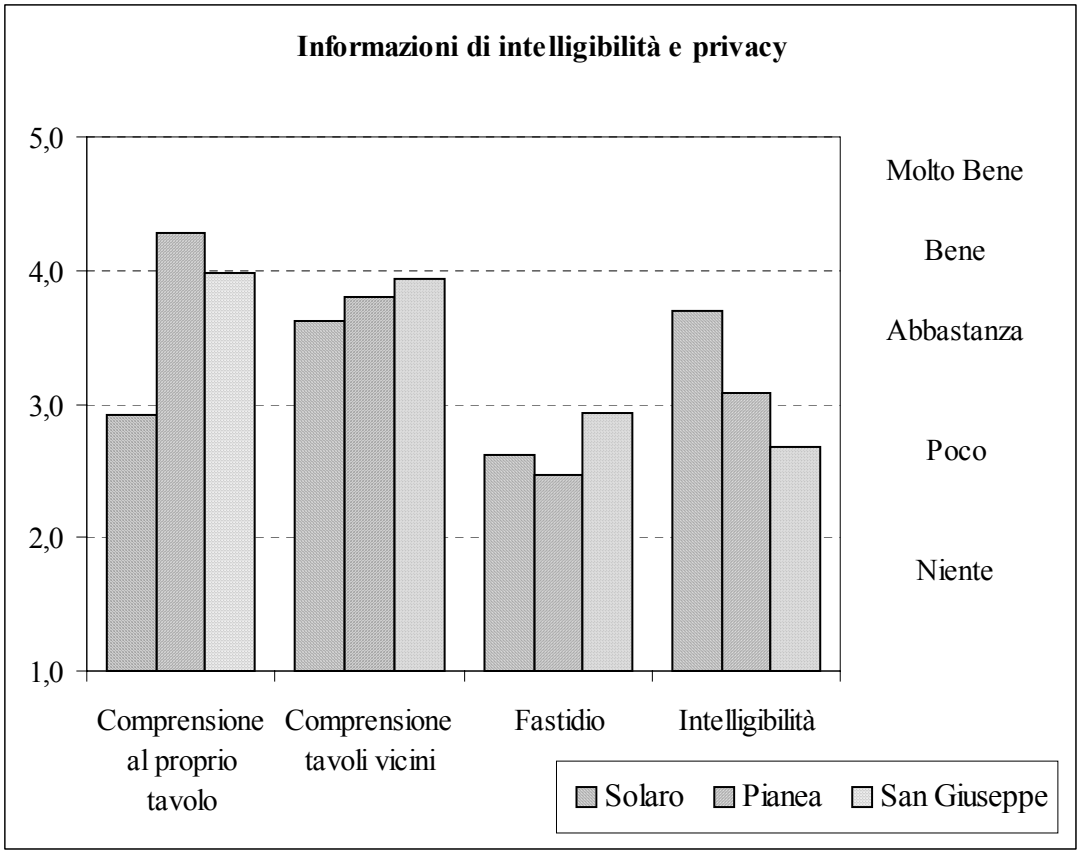
Tab. 5.4 - *Suddivisione dei bambini per età e sesso*

In questi casi studio si nota una percentuale maggiore di maschietti; inoltre i bambini del campione sono piuttosto piccoli perché una maggioranza di loro frequenta solo i primi tre anni dell'educazione primaria e la situazione va sottolineata perché dimostrato come a questa età i bambini sembrano non manifestare particolari reazioni da disturbo nei confronti del rumore.

La seconda parte di domande è volta ad individuare una valutazione, da parte dei bambini, sul comfort acustico.

Informazioni di intelligibilità e privacy al tavolo				
Scuola	Comprensione al proprio tavolo [5: Molto bene; 1: Niente]	Comprensione al tavolo vicino [5: Molto bene; 1: Niente]	Fastidio provocato dal rumore [5: Moltissimo; 1: Niente]	Intelligibilità (maestra che parla) [5: Molto bene; 1: Niente]
Solaro	3,6	2,4	3,9	3,2
Pianea	3,6	2,3	3,3	3
San Giuseppe	3,9	2,9	2,7	3,5

Tab. 5.5 - *Valutazione di privacy e intelligibilità*



Tab. 5.6 - *Istogramma dei dati di intelligibilità e privacy*

Osservando i risultati dei questionari compilati, emerge che la conversazione al proprio tavolo ha ottenuto un indice che va da 3.6 delle scuole di Livorno Ferraris a 3.9 dell'istituto di Torino e che corrisponde ad una valutazione sulla scala a 5 punti, intermedia tra "abbastanza" e "molto"; invece la conversazione ai tavoli vicini viene in genere "poco" percepita.

L'intelligibilità del parlato è stata valutata mediante una domanda volta a verificare in che misura bambini riescono a sentire bene le parole della maestra senza poterla vedere in volto, ovvero senza l'aiuto della lettura labiale. I bambini hanno risposto quasi tutti che riescono sentire la maestra abbastanza bene.

Ho voluto poi chiedere ai bambini in che misura il rumore che c'è nella mensa desse loro fastidio. Ho inserito il quesito anche nell'altra serie di domande per ricordare loro quale fosse l'argomento principale del discorso. Anche in questo caso i bambini hanno risposto con una valutazione media: il rumore provoca loro "abbastanza" fastidio.

Conseguenze del rumore					
Scuola	*Tranquillo*	*Distratto*	*Affaticato*	*Arrabbiato*	*Come prima*
Solaro	97%	16%	8,3%	13,9%	66,7%
Pianea	88%	26%	12%	20%	88%
San Giuseppe	93%	10%	4,6%	2,3%	90,1%

Tab. 5.7 - *Percentuali di risposte positive alle domande sulle conseguenze del rumore*

L'ultima parte di domande è riguarda le conseguenze che il rumore può provocare nei bambini. La maggior parte dice che il rumore dà loro fastidio ma dicono di non avere conseguenze. In ogni caso chi di loro, tra i più grandi, ha voluto aggiungere qualche riga, ha confermato di collegare la distrazione, la rabbia o l'affaticamento alla mancanza di voglia di seguire le lezioni più che a una conseguenza del rumore subito in mensa o nell'arco della giornata: in sostanza vorrebbero giocare e non stare in un aula scolastica.

5.2.3 Conclusioni

In linea generale penso che nella situazione studiata, cioè quella della pausa pranzo in una scuola elementare, i bambini non cerchino una conversazione tranquilla con i compagni di tavolo ma piuttosto cerchino un momento di svago in cui esprimere la loro vivacità insieme a tutti i compagni che si trovano contemporaneamente nella sala. In questa situazione, nel momento in cui si accorgono di non riuscire a comunicare per via dell'elevato rumore di fondo, aggiustano autonomamente lo sforzo vocale fino a che i loro compagni, anche tra i più lontani, non riescono a comprendere il senso della conversazione (*cocktail party phenomenon*). Proprio per questo motivo i bambini hanno dimostrato di non comprendere a fondo il significato di privacy o di non curarsene.

Dove i bambini hanno potuto e voluto rispondere liberamente con parole loro, hanno dimostrato di non provare particolare fastidio a causa dell'elevato rumore presente in sala. Di sicuro le risposte dipendono dal fatto che così piccoli gli studenti non sembrano intuire l'effettiva entità del disturbo e non riconoscono il malessere che ne può derivare, ma anche dal fatto che, alcuni di loro in certi quesiti non hanno proprio capito che si facesse riferimento al rumore presente nella mensa. Ad esempio alcuni bambini hanno aggiunto alcuni commenti dove affermavano di seguire con difficoltà le parole della maestra non tanto perché affaticati dal frastuono della mensa ma perché il rumore presente in aula non permetteva loro di sentire bene la spiegazione del momento.

Penso che quest'ultima situazione dipenda principalmente dal momento della somministrazione: i questionari sono stati distribuiti in aula dalle rispettive maestre che hanno deciso liberamente quando consegnare i questionari ai bambini, permettendo anche di rispondere a tutti quegli studenti che il giorno delle misure non erano presenti. Credo che fatti in un momento lontano dal pasto, non abbia aiutato i bambini a rispondere correttamene alle domande perché a quell'età è più difficile il processo di elaborazione dei ricordi. Rispondere ai quesiti subito dopo il pranzo, ancora seduti ai tavoli della mensa, avrebbe aiutato loro a focalizzare meglio i quesiti e non avrebbero dovuto pescare nella memoria situazioni avvenute troppo tempo prima ma appena successe.

Nonostante questi problemi i risultati non sono stati negativi come si potrebbe pensare in un primo momento. Bisogna pensare con un po' più di attenzione alla situazione che si crea all'interno di una mensa durante la pausa pranzo. Per esempio i bambini hanno confermato di sentire e capire bene le parole della maestra: la risposta non va intesa come un errore dei bambini ma è più chiaramente comprensibile se si pensa che in

genere gli insegnanti in queste situazioni urlano e per questo motivo gli studenti danno loro ascolto o comunque l'elevato tono di voce arriva più facilmente alla loro attenzione. Detto questo però si legge nel grafico 5.6 che i bambini della Scuola elementare Solaro riconoscono di capire meglio le parole della maestra rispetto agli studenti dell'Istituto San Giuseppe, situazione confermata dai dati: nella prima mensa l'indice STI, per quanto insufficiente, era di gran lunga superiore rispetto alla seconda.
Inoltre i dati sono una conferma del fatto che i bambini non sono in grado di contenere autonomamente il rumore durante l'ora del pranzo e poiché non si rendono conto che l'esposizione ad un rumore eccessivo può causare loro dei danni, tocca alla scuola prevedere degli accorgimenti che possano migliorare il comfort acustico delle mense come degli ambienti scolastici in genere.

5.3 Bibliografia

1. S. CINGOLANI, R. SPAGNOLO, *Acustica musicale e architettonica*, Torino, UTET, 2005
2. A. ASTOLFI, *Schede di fisica tecnica ambientale, Acustica,* Torino, Politeko, 2001
3. R. SPAGNOLO, *Manuale di Acustica*, Torino, UTET, Marzo 2001
4. AA.VV., *Corso di formazione in Acustica Applicata – Torino, maggio - giugno 1999*, Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris – Laboratorio di Acustica, Torino, 1999
5. E. CIRILLO, *Acustica Applicata*, Milano, Mc Graw-Hill, 1997

Tesi di laurea

6. A. MARCHIOLE', *L'acustica dei locali per la ristorazione,* Politecnico di Torino, Facoltà di Architettura, relatore: prof. Marco Filippi, A.A. 2001 – 2002
7. C. GULINO, *L'acustica nelle aule scolastiche*, Politecnico di Torino, Facoltà di Architettura, relatore: prof. Marco Filippi, arch. Arianna Astolfi, A.A. 2001- 2002

Articoli

8. L. BERTUZZI, M. GIANNELLI, R. SABATINI, C. DELUCIS, M. VICENTINI, P. LENZUNI, *Livello di pressione sonora nelle mense scolastiche,* Associazione Italiana di Acustica, 32° Convegno Nazionale, Ancona, 15 – 17 giugno 2005
9. A. FARINA, *Metodologie di misura e valutazione* – AES seminario 2001
10. A. ASTOLFI, M. FILIPPI*, Good Acoustical Quality in Restaurants: a Compromise Between Speech Intelligibility and Privacy,* International Conference on Acoustics - ICA 2004, Kyoto 4 - 9 aprile 2004
11. A.ASTOLFI, V. CORRADO, M.FILIPPI, S. VIAZZO, *Classroom Acoustic Assessment: Analysis of Subjective Answers and Measured Indices*, Euronoise Naples 2003
12. A. W. BRONKHORST, *The Cocktail Party Phenomenon: A Review of Reserach on Speech Intelligibility in Multiple-Talker Condition*, ACTA ACUSTICA Vol. 86 (2000), pp. 117-128.
13. *Quiet Areas in restaurants*, Final Report to U.S. Architectural and Transportation Barriers Compliance Board, under contract No. QA92004001, December 1993

14. R. PLOMP, *Acoustical Aspects of Cocktail Parties,* ACUSTICA Vol. 38 (1977), pp. 186-191.

Siti internet

15. www.isover.it

CAPITOLO 6

LA VALUTAZIONE DELL'INTELLIGIBILITA'

6.1 Il calcolo dello STI

In linea generale nell'ambito di ambienti realizzati per la ristorazione, si può affermare che se al proprio tavolo è auspicabile avere una intelligibilità relativamente buona o discreta, tra i diversi tavoli è invece preferibile avere una certa privacy, ovvero, in altre parole, una scarsa intelligibilità. Di conseguenza la valutazione dell'intelligibilità va realizzata in un ambito più ampio, oltre cioè all'isola spaziale del tavolo, in modo da realizzare nelle sale da pranzo un giusto equilibri spaziale.

La valutazione spaziale dell'intelligibilità della parola in questa tesi si basa sull'indice di intelligibilità STI (*Speech Transmission Index*) già trattata nel capitolo dedicato all'intelligibilità del parlato.

Le misure per il calcolo dello STI sono state realizzate in corrispondenza di alcuni punti delle diverse sale, in modo da ottenere l'andamento spaziale sull'intera superficie dei locali, considerando una sorgente (testa artificiale) posizionata su di una sedia di un tavolo, in assenza degli studenti ma, come in tutte le altre misure, sono stati utilizzati i pannelli di lana di vetro per simulare la loro presenza.

Prima di recarsi in campo per eseguire le diverse misure necessarie per la definizione dello STI, sono stati prestabiliti i punti di riferimento sulla planimetria delle diverse sale in modo da progettare la procedura delle misure stesse per poi realizzare una mappa di distribuzione dei valori calcolati.

La sorgente è stata collocata in modo da coincidere con la reale posizione di un bambino normalmente seduto al proprio tavolo, prima ad un metro di distanza dall'ascoltatore, cioè il microfono, a sua volta sistemato in modo da trovarsi all'altezza delle orecchie di un ipotetico utente, poi in modo da raggiungere in direzione diagonale i punti prescelti.

La sorgente sonora utilizzata è un manichino con bocca artificiale normalizzata (*Bruel & Kjaer head and torso simulator tipo 4128*), in grado di riprodurre la stessa direttività creata dalla testa umana. L'altoparlante posizionato all'interno della testa del manichino, permette al suono emesso di eseguire tutte quelle riflessioni dovute alla

fisionomia facciale provvedendo così ad effettuare una corretta simulazione del campo sonoro generato attorno ad un corpo umano.

Fig. 6.1 - *Manichino Bruel & Kjaer type 4128*

Per riprendere il concetto già accennato nel secondo capitolo, lo STI viene calcolato a partire dalla funzione di trasferimento della modulazione (MTF). Il calcolo della MTF e di conseguenza dello STI può essere effettuata a partire dalla risposta all'impulso, opportunamente filtrata per ciascuna banda d'ottava.

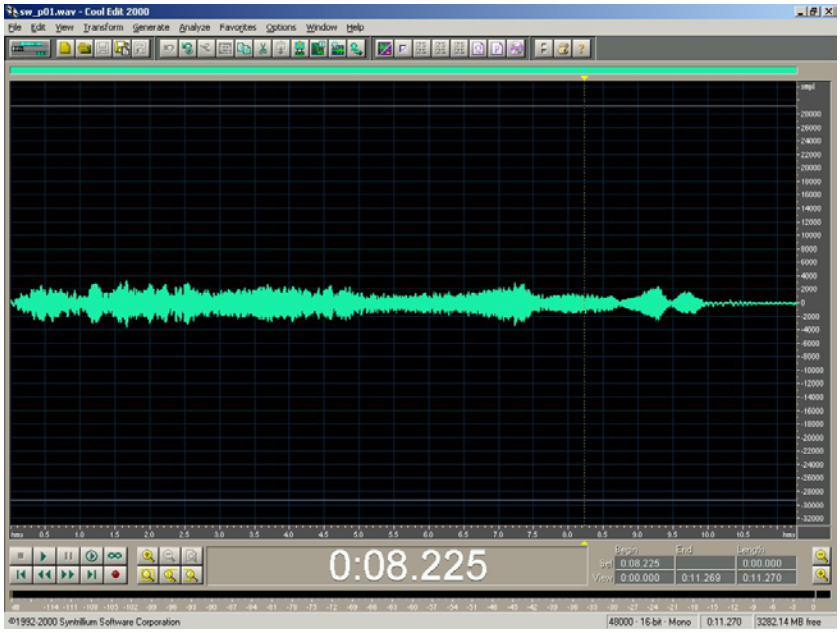


Fig. 6.2 - *Segnale sweep per la determinazione della risposta all'impulso*

Il primo set di misure viene realizzato sistemando la sorgente su di una sedia nel punto stabilito in partenza, nella posizione che realmente adotterebbe uno studente seduto al tavolo. Il manichino emette un segnale, detto *sweep*, che è composto da una forma d'onda di tipo sinusoidale puro che parte dalle frequenze basse e sale verso l'alto al trascorrere del tempo, e si registra tale segnale con un microfono regolato alla stessa altezza delle orecchie di un ipotetico ascoltatore.

Il segnale viene registrato ad un metro di distanza dalla bocca del manichino ed in diversi punti della mensa, per ricavare successivamente la risposta all'impulso attraverso il programma di calcolo Aurora e per determinare, di conseguenza, l'indice STI nei punti di misura.

Il secondo set di misure viene realizzato sempre con il manichino posizionato nel punto stabilito in precedenza ma questa volta viene registrato un secondo tipo di segnale. Questo suono emesso è composto da una sequenza di segnale di tipo deterministico di massima lunghezza (MLS, *Maximum Length Sequence*) tale da riprodurre un livello di sforzo vocale "forte" (68 dB(A) ad un metro dalla bocca in campo libero). Il manichino emette un suono costante e continuo nel tempo, per permettere un'acquisizione del livello sonoro confrontabile nei diversi punti stabiliti.

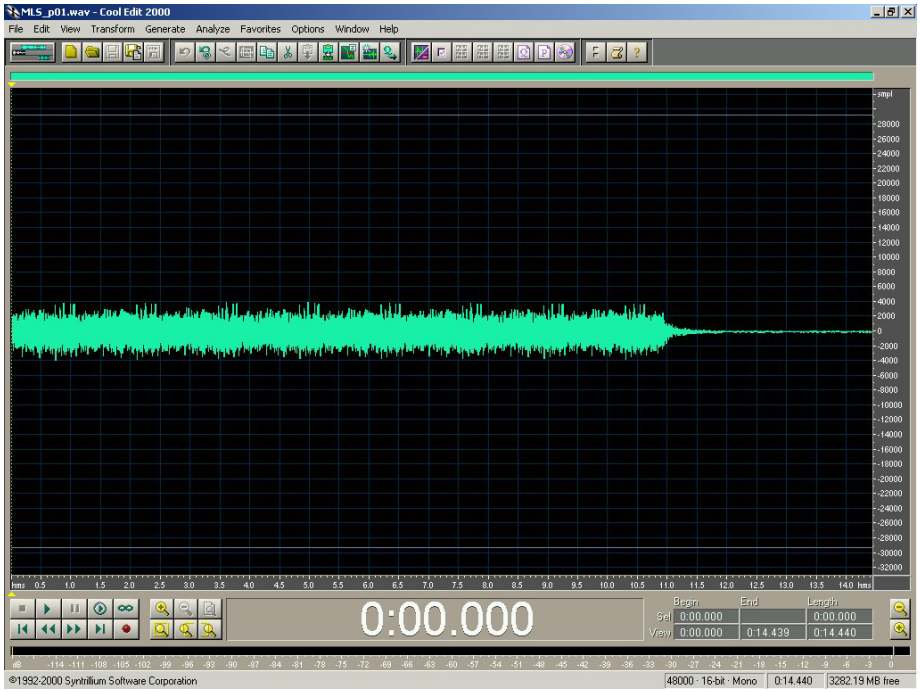


Fig. 6.3 - *Segnale MLS*

Di seguito sono inserite le planimetrie con la posizione della sorgente e del manichino per ognuna delle tre mense. In più sono allegate le tabelle con i valori utilizzati per la determinazione dello STI tramite il programma di calcolo Aurora

SCUOLA ELEMENTARE "SOLARO"

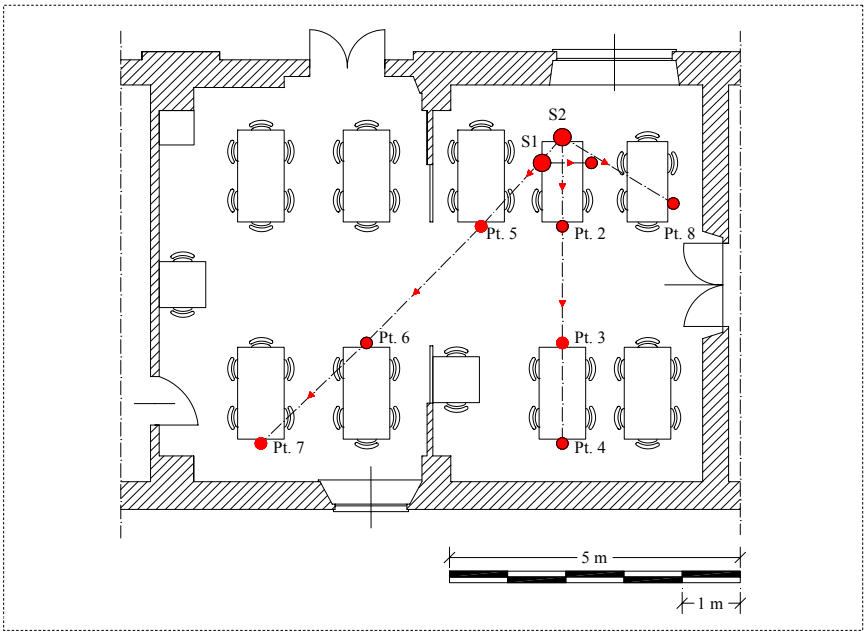


Fig. 6.4 - *Disposizione dei punti di misura e della sorgente*

Fig. 6.5 - *Immagini riprese durante alcuni momenti delle misure*

Scuola elementare Solaro	Frequenze	Livello rumore di fondo (dB)	Punto 1 (dB)	Punto 2 (dB)	Punto 3 (dB)	Punto 4 (dB)	Punto 5 (dB)	Punto 6 (dB)	Punto 7 (dB)	Punto 8 (dB)
	125	63.9	76.8	74.0	74.0	72.7	73.3	68.0	67.2	75.2
	250	69.9	78.6	76.7	72.6	74.6	73.2	68.7	67.6	72.3
	500	72.7	75.8	73.2	67.2	66.3	68.3	61.6	59.1	66.4
	1000	74.5	68.8	69.5	61.7	60.7	61.5	55.8	52.9	61.5
	2000	71.3	57.6	52.2	50.8	50.2	50.3	44.8	41.5	49.9
	4000	65.1	54.7	53.0	44.4	43.5	44.6	38.0	34.6	43.6
	8000	44.8	48.9	454.7	38.6	35.9	34.1	26.2	23.3	31.1

Tab. 6.1 - *Livelli sonori misurati nei vari punti della sala e utilizzati nel modulo Aurora per il calcolo dello STI*

SCUOLA ELEMENTARE "PIANEA"

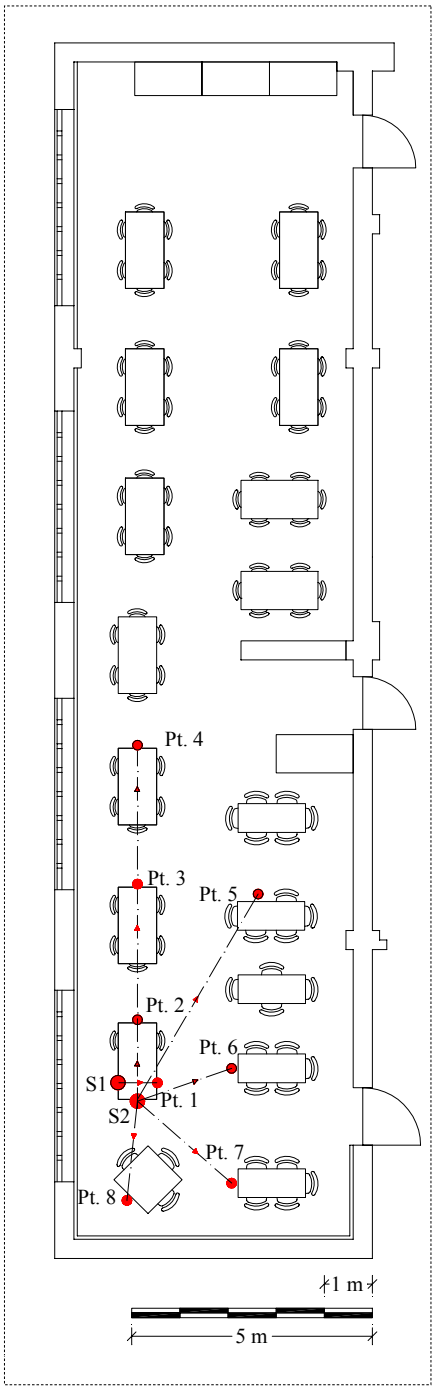


Fig. 6.6 - *Posizione della sorgente e dei punti di misura*

Fig. 6.7 - *Alcuni momenti durante le misure e primo piano della sorgente sonora*

Scuola elementare Pianea	Frequenze	Livello rumore di fondo (dB)	Punto 1 (dB)	Punto 2 (dB)	Punto 3 (dB)	Punto 4 (dB)	Punto 5 (dB)	Punto 6 (dB)	Punto 7 (dB)	Punto 8 (dB)
	125	60.1	76.9	74.0	74.3	73.5	72.0	71.4	69.8	69.0
	250	69.7	78.9	78.6	75.1	75.4	74.1	73.8	71.9	69.8
	500	77.9	76.8	73.2	66.7	65.9	64.8	66.1	65.7	65.7
	1000	81.3	68.8	68.7	63.7	62.8	62.1	60.8	61.1	61.2
	2000	76.9	57.9	53.7	51.6	50.8	50.8	49.8	50.2	50.0
	4000	68.6	55.9	50.6	45.0	43.7	43.6	43.2	42.4	42.6
	8000	55.9	49.6	43.6	35.6	33.8	32.7	30.0	29.4	29.3

Tab. 6.2 - *Livelli sonori misurati nei vari punti della sala e utilizzati nel modulo Aurora per il calcolo dello STI*

SCUOLA ELEMENTARE "ISTITUTO SAN GIUSEPPE"

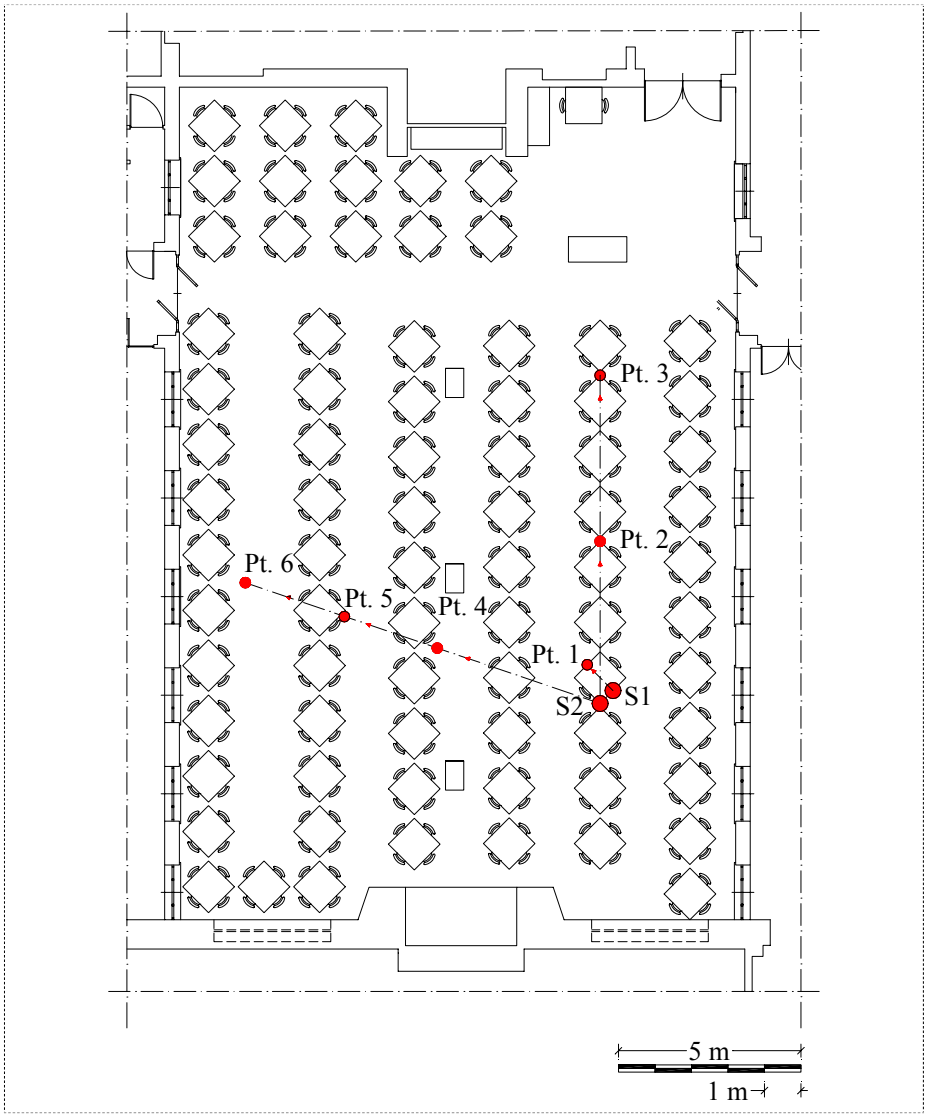


Fig. 6.8 - *Disposizione dei punti di misura e della sorgente*

Fig. 6.9 - *Immagini riprese durante alcuni momenti delle misure*

Scuola elementare Istituto San Giuseppe	Frequenze	Livello rumore di fondo (dB)	Punto 1 (dB)	Punto 2 (dB)	Punto 3 (dB)	Punto 4 (dB)	Punto 5 (dB)	Punto 6 (dB)
	125	65.9	74.8	68.6	67.4	67.5	67.6	67.5
	250	70.2	76.8	68.5	69.4	68.3	65.1	67.4
	500	78.2	75.7	61.1	61.4	60.6	59.9	61.3
	1000	83.1	69.1	57.2	55.1	57.6	56.7	56.6
	2000	80.9	53.4	48.3	47.0	47.1	45.8	45.5
	4000	74.5	54.9	42.7	39.7	40.6	38.3	37.9
	8000	62.9	48.1	31.6	29.3	28.0	26.0	25.8

Tab. 6.3 - *Livelli sonori misurati nei vari punti della sala e utilizzati nel modulo Aurora per il calcolo dello STI*

L'operazione che consente di ottenere la risposta all'impulso è detta deconvoluzione: si deve convolvere il segnale di test (sweep) registrato nei diversi punti di misura con il filtro inverso. Questo procedimento con il Plug-in di Cool Edit "Aurora" il risulta semplice e si ottiene la risposta all'impulso in modo immediato.

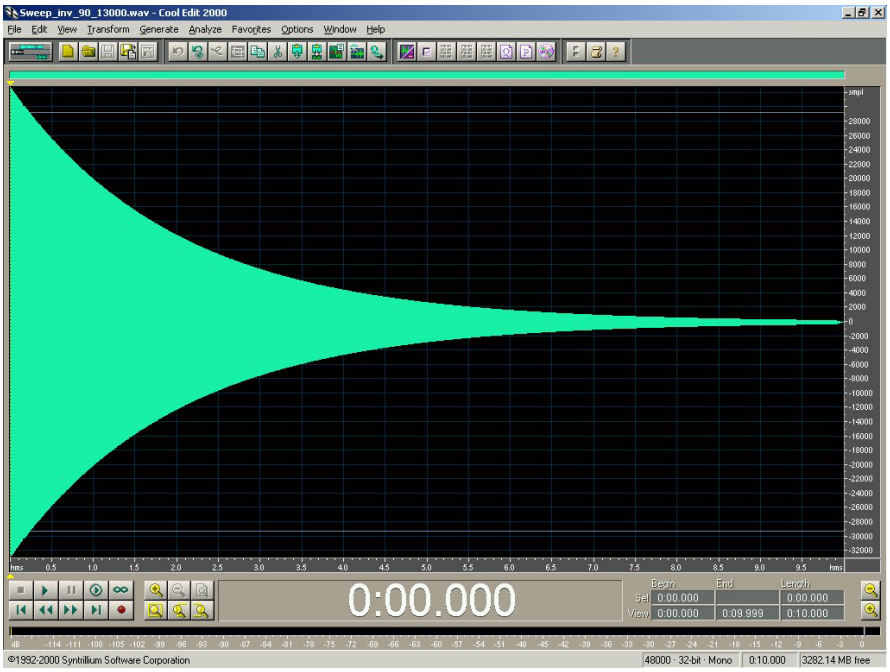


Fig. 6.10 - *Sweep inversa utilizzata per il calcolo della risposta all'impulso*

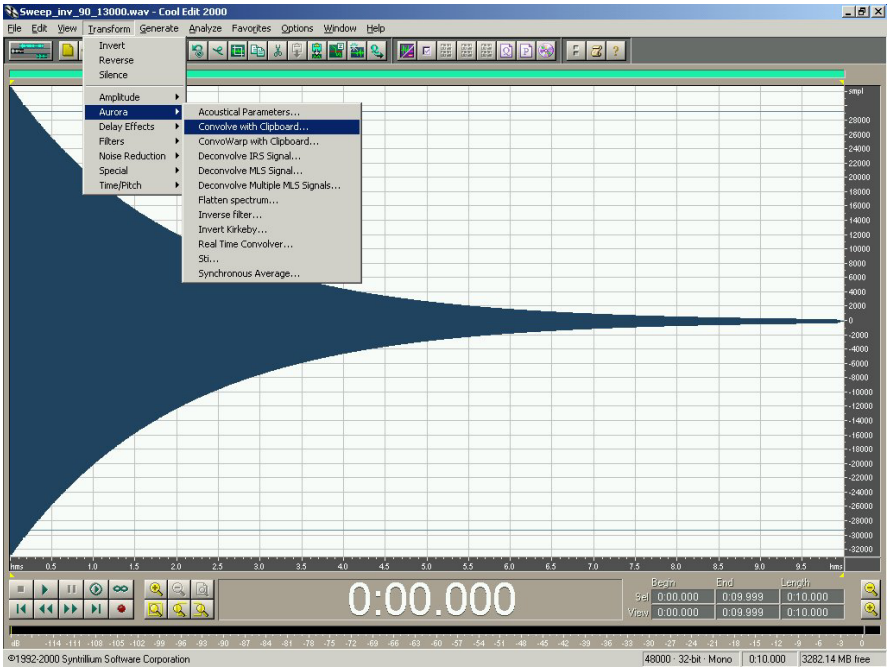


Fig. 6.11 – *Procedimento per il calcolo della risposta all'impulso*

A questo punto, in possesso della risposta all'impulso calcolata mediante le sweep, del livello di rumore di fondo emesso dai bambini e misurato durante l'ora del pranzo e con i livelli sonori recepiti dal microfono nei vari punti con la tecnica MLS è possibile calcolare lo STI che viene determinato mediante il programma di calcolo Aurora.

Per prima cosa è necessario caricare in Cool Edit il file contenente la risposta all'impulso.

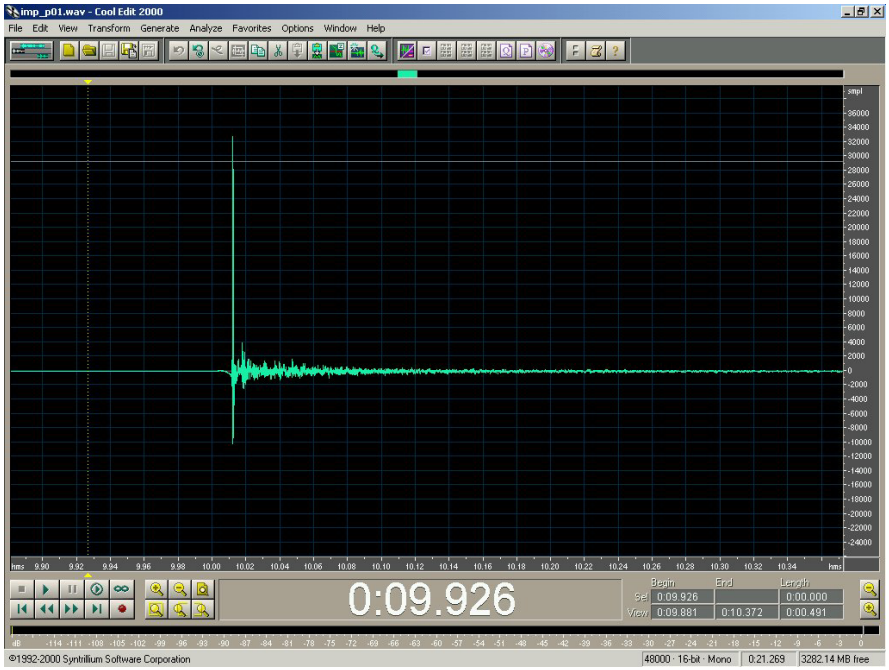


Fig. 6.12 - *Risposta all'impulso del punto di misura 1 della scuola "Solaro"*

Dal menù *Effects –Aurora* si deve poi selezionare la funzione "*Calculate STI*".

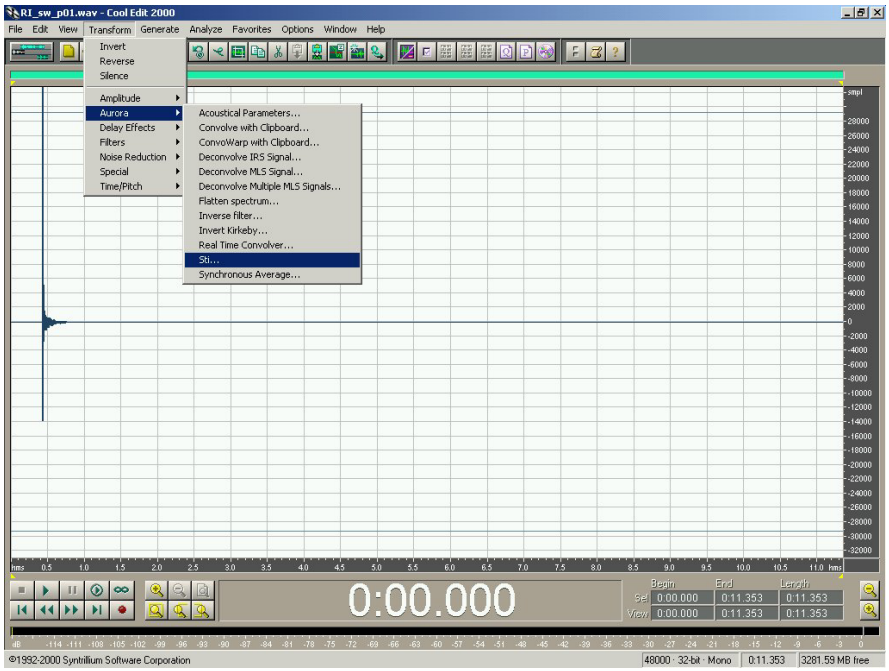


Fig. 6.13 – *Procedimento per il calcolo dello STI*

A questo punto compare una dialog-box in cui si devono inserire i livelli del rumore di fondo (registrato durante il pranzo) e del segnale di test senza rumore di fondo registrato in corrispondenza dell'ascoltatore.

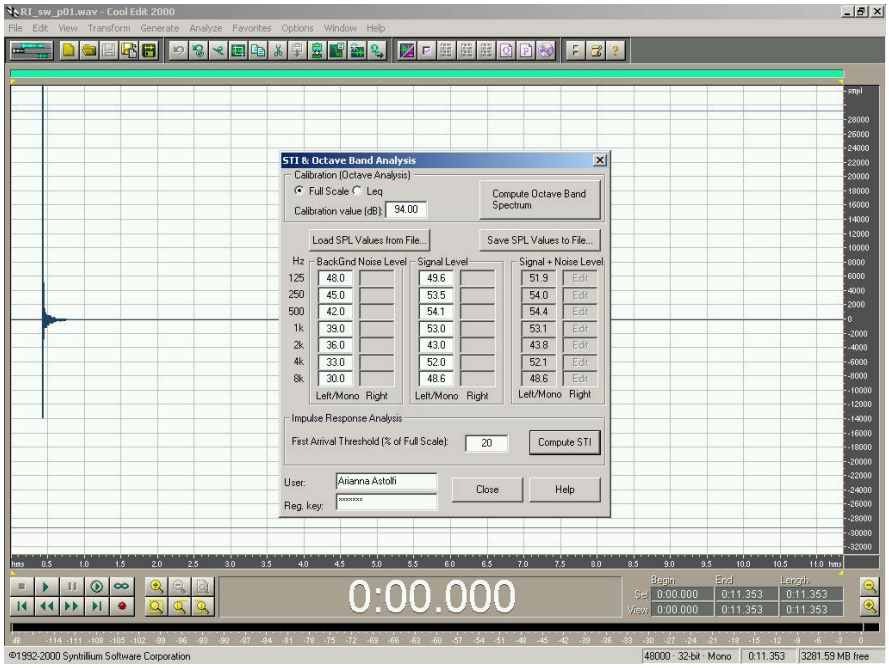


Fig. 6.14 – *Finestra in cui inserire i livelli di rumore di fondo misurati*

Per far processare al calcolatore i dati inseriti si deve selezionare il tasto OK e dopo pochi secondi viene visualizzata sullo schermo una nuova finestra con il valore dello STI.

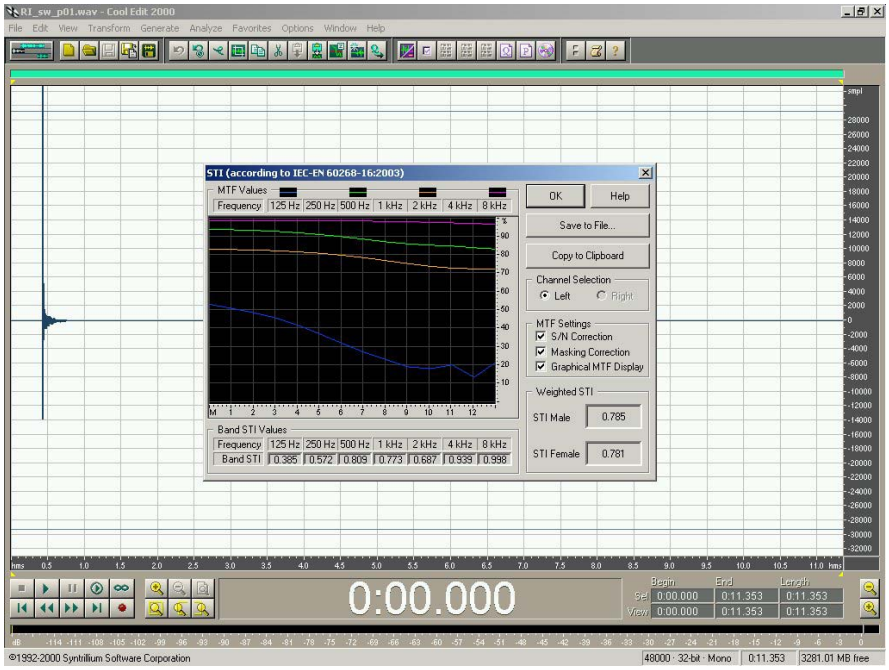


Fig. 6.15 – *Risultati dello STI*

6.2 Hypercomfort

Hypercomfort è uno programma, realizzato dal Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino, che mira alla rappresentazione di tutti i vari aspetti inerenti al comfort termico, visivo e acustico degli ambienti oggetto di studio.

Per quanto riguarda lo studio intrapreso in questa tesi, una volta calcolato lo STI per ogni punto della sala, il passaggio successivo è stato quello di inserire i dati ottenuti all'interno del programma di simulazione *Hypercomfort* per ottenere degli schemi planimetrici di distribuzione spaziale dell'indice: il programma, a partire da un semplice modello tridimensionale della sala da controllare, traccia delle curve iso-livello, ottenute dall'interpolazione dei vari dati ottenuti durante le misure.

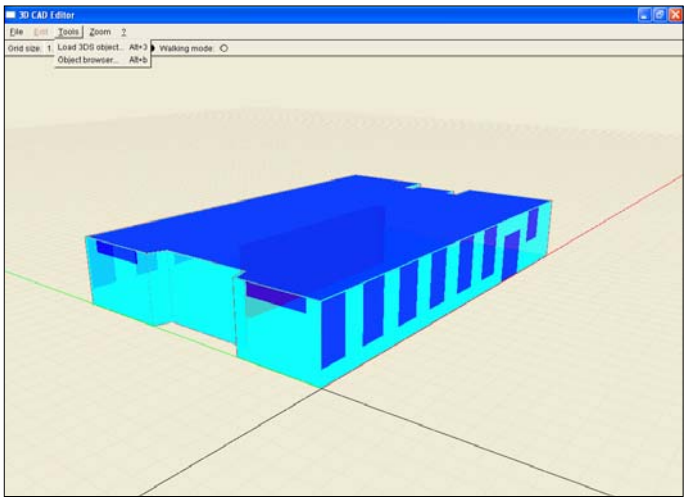


Fig. 6.16 - *Modello tridimensionale della mensa dell'Istituto San Giuseppe*

Il modello geometrico è stato realizzato mediante il modulo *3d Cad Editor* interno al softaware. Lo schema che consente è piuttosto semplice e consiste in un modello tridimensionale dell'involucro definito solamente dalle superfici di contorno; inoltre permette di realizzare dei modelli articolati inserendo superfici e arredi che possono essere ricavati da una libreria del programma attraverso la finestra *Load 3d Object*, oppure inseriti personalmente in formato .3ds, secondo un sistema di coordinate cartesiane nello spazio.

A partire dalla realizzazione del modello geometrico è possibile procedere con le simulazioni e con le rappresentazioni spaziali delle misure. Per poter elaborare i calcoli e realizzare le mappe spaziali, il programma chiede di inserire la serie di dati ottenuti durante la campagna di misure.

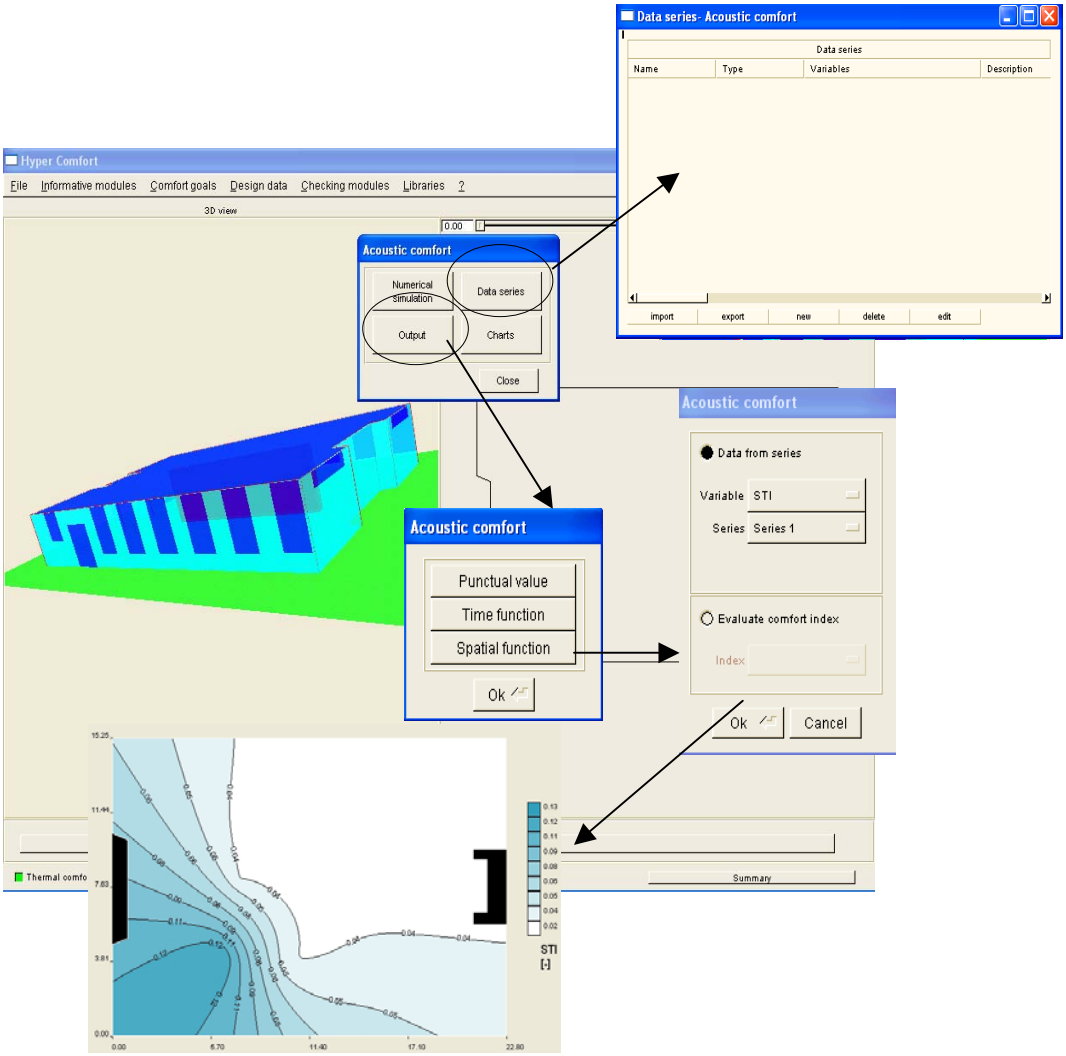


Fig. 6.17 - *Schema logico per la realizzazione delle planimetrie*

Attraverso la finestra "*Data series*" è possibile inserire i valori dell'indice STI calcolato nei punti di misura e le rispettive coordinate geometriche; quindi si seleziona il comando "*Output* " che consente di visualizzare la rappresentazione spaziale del parametro o dell'indice scelto.

Di seguito riporto le planimetrie delle tre mense oggetto di studio elaborate con Hypercomfort: ognuno di questi schemi planimetrici si riferiscono alla sola ed unica situazione di calcolo e cioè con il manichino e il microfono nei punti stabiliti per quella determinata sala, in quel particolare giorno e con rumore di fondo diffuso provocato dai bambini durante l'ora del pranzo.

Nelle tabelle sono inserite tutte le indicazioni di carattere spaziale e di calcolo necessarie per la realizzazione degli schemi planimetrici con Hypercomfort.

Per rendere più veloce la lettura delle mappe, voglio ricordare la correlazione tra il valore dell'indice STI e le diverse categorie di comunicazione:

Classe di qualità di comunicazione	Valore di STI
pessima	<0.2
scadente	0.2 – 0.4
discreta	0.4 – 0.6
buona	0.6 – 0.8
ottima	>0.8

Tab. 6.4 - *Correlazione tra il valore dello STI e la qualità della comunicazione*

SCUOLA ELEMENTARE "SOLARO"

Punto	X	Y	STI
Sorgente 1	-2,91	5,55	
Sorgente 2	-2,41	5,99	
P.to 1	-1,91	5,55	0,267
P.to 2	-2,41	4,44	0,219
P.to 3	-2,41	2,41	0,088
P.to 4	-2,41	0,66	0,083
P.to 5	-3,80	4,44	0,097
P.to 6	-5,78	2,4	0,041
P.to 7	-7,59	0,66	0,031
P.to 8	-0,5	4,84	0.083

Tab .6.5 - *Valori dello STI nei diversi punti della mensa e rispettive coordinate geometriche*

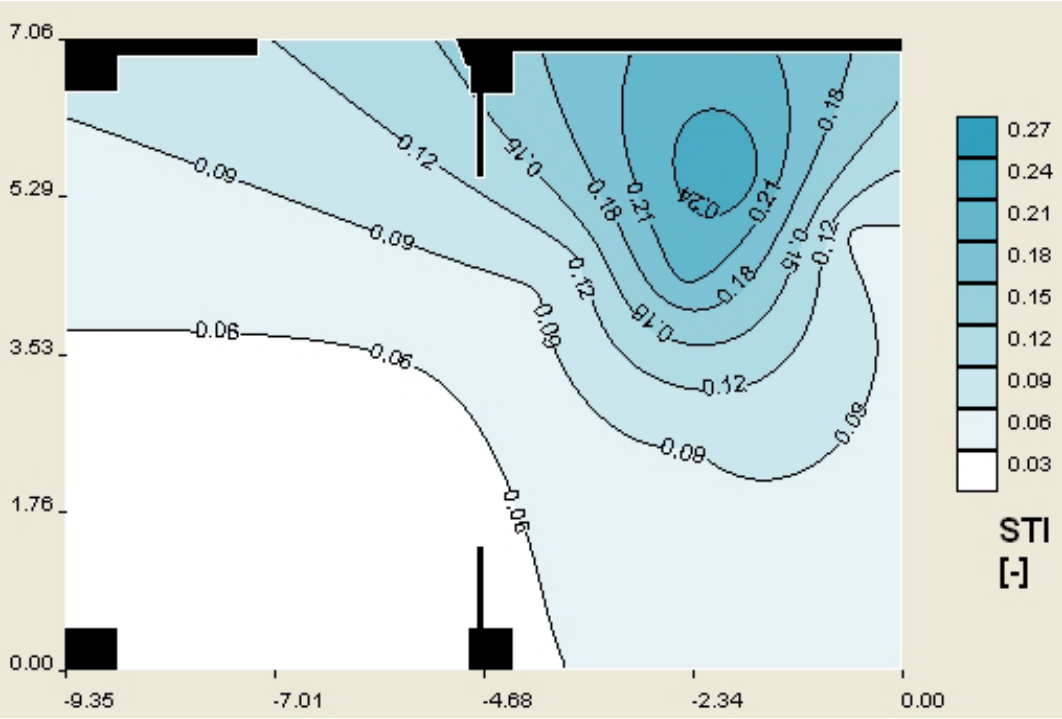


Fig. 6.18 - *Rappresentazione spaziale dello STI*

INTELLIGIBILITA' SCADENTE

SCUOLA ELEMENTARE "PIANEA"

Punto	X	Y	STI
Sorgente 1	3,28	4,97	
Sorgente 2	2,88	4,81	
P.to 1	3,28	3,96	0,197
P.to 2	4,58	4,81	0,133
P.to 3	7,42	4,81	0,060
P.to 4	10,32	4,81	0,057
P.to 5	7,21	1,97	0,056
P.to 6	3,57	2,52	0,053
P.to 7	1,17	2,52	0,052
P.to 8	0,81	4,70	0.049

Tab .6.6 - *Valori dello STI nei diversi punti della mensa e rispettive coordinate geometriche*

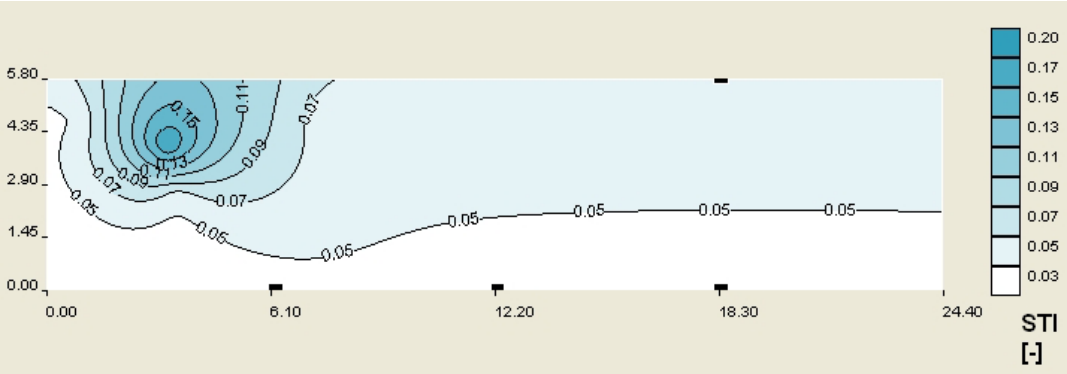


Fig. 6.19 - *Rappresentazione spaziale dello STI*

INTELLIGIBILITA' NULLA

SCUOLA ELEMENTARE "ISTITUTO SAN GIUSEPPE "

Punto	X	Y	STI
Sorgente 1	6,27	3,36	
Sorgente 2	5,92	3,71	
P.to 1	6,28	4,07	0,134
P.to 2	10,36	3,71	0,037
P.to 3	14,9	3,71	0,043
P.to 4	7,43	8,16	0,035
P.to 5	8,33	10,71	0,026
P.to 6	9,23	13,44	0,029

Tab .6.7 - *Valori dello STI nei diversi punti della mensa e rispettive coordinate geometriche*

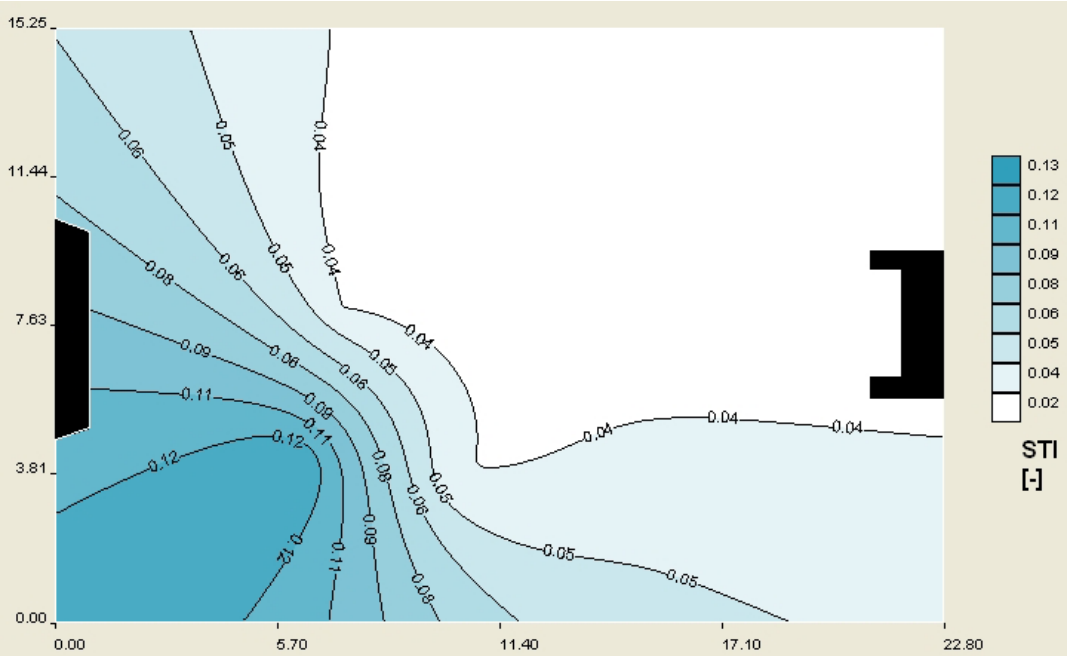


Fig. 6.20 - *Rappresentazione spaziale dello STI*

INTELLIGIBILITA' NULLA

6.2.1 Conclusioni

In tutte e tre le situazioni l'indice STI presenta valori estremamente bassi, anche al di sotto dello 0.2, segno che, all'interno di queste sale, la qualità delle comunicazioni è molto scadente. I risultati non sono altro che la conferma di quello detto in precedenza: un tempo di riverberazione eccessivo, una tipologia di avventori di per sé già chiassosa, un livello di pressione sonora e una densità di occupazione elevati sono i fattori che più influenzano il comfort acustico in generale e più nello specifico l'intelligibilità del parlato.

Dei tre casi la mensa della Scuola "Solaro" di Livorno Ferrarsi è l'unica sala trattata acusticamente: infatti il tempo di riverberazione è, nelle frequenze centrali, vicino al valore ottimale.

L'ambiente, che non è fortemente riverberante, a differenza delle altre due scuole presenta dei valori di STI, almeno in prossimità della sorgente, superiori a 0.2; nonostante ciò, l'intelligibilità al tavolo è comunque da considerarsi scadente: se è vero che viene rispettato il discorso della privacy al tavolo, in ogni caso è probabile che i bambini facciano molta fatica a comunicare con i compagni seduti a fianco. Probabilmente il fattore che incide maggiormente sul livello di intelligibilità della parola è soprattutto il livello di rumore di fondo che risulta molto elevato durante tutta l'ora del pranzo.

Negli altri due casi l'elevato rumore di fondo si accompagna poi ad ambienti molto riverberanti: i valori dello STI sono al di sotto dello 0.2 e si individua una situazioni in cui risulta impossibile ogni tipo di comunicazione al tavolo.

Dato che il campo sonoro è intenso, il bambino tenderà ad alzare il livello della sua voce fino a che il messaggio che intende esprimere non sarà correttamente compreso: in questi casi si deve intervenire in modo da ridurre la rumorosità e consentire al bambino di comunicare senza un eccessivo sforzo vocale. Poiché è difficile che gli studenti durante la ricreazione abbassino autonomamente la voce, si può intervenire riducendo il livello sonoro nell'ambiente con progetti di bonifica acustica.

Nel capitolo successivo propongo il progetto di miglioramento dell'acustica della mensa della scuola "Solaro" a Livorno Ferraris che, fra le tre studiate, è quella che presenta un modello geometrico di dimensioni ridotte e che consente verifiche con un software di simulazione in tempi più ristretti.

6.3 Bibliografia

1. S. CINGOLANI, R. SPAGNOLO, *Acustica musicale e architettonica*, Torino, UTET, 2005
2. A. ASTOLFI, *Schede di fisica tecnica ambientale, Acustica,* Torino, Politeko, 2001
3. R. SPAGNOLO, *Manuale di Acustica*, Torino, UTET, Marzo 2001
4. AA.VV., *Corso di formazione in Acustica Applicata – Torino, maggio - giugno 1999*, Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris – Laboratorio di Acustica, Torino, 1999
5. E. CIRILLO, *Acustica Applicata*, Milano, Mc Graw-Hill, 1997

Tesi di laurea

6. A. MARCHIOLE', *L'acustica dei locali per la ristorazione,* Politecnico di Torino, Facoltà di Architettura, relatore: prof. Marco Filippi, A.A. 2001 – 2002
7. C. GULINO, *L'acustica nelle aule scolastiche*, Politecnico di Torino, Facoltà di Architettura, relatore: prof. Marco Filippi, arch. Arianna Astolfi, A.A. 2001- 2002
8. S. LEVORIN, *Studio acustico di auditorium scolastici*, Politecnico di Torino, I Facoltà di Architettura, relatore: prof. Marco Filippi, arch. Arianna Astolfi, A.A 2002-2003
9. A. RICCARDI, *Applicazione di software di simulazione numerica in acustica architettonica. La sala conferenze del Museo Regionale di Scienze naturali in Torino*, Politecnico di Torino, Facoltà di architettura, relatore: prof. Marco Filippi, arch. Arianna Astolfi, A.A. 2001/2002

Articoli

10. A. FARINA, *Metodologie di misura e valutazione* – AES seminario 2001
11. A. W. BRONKHORST, *The Cocktail Party Phenomenon: A Review of Reserach on Speech Intelligibility in Multiple-Talker Condition*, ACTA ACUSTICA Vol. 86 (2000), pp. 117-128.
12. R. PLOMP, *Acoustical Aspects of Cocktail Parties,* ACUSTICA Vol. 38 (1977), pp. 186-191.
13. A.ASTOLFI, M. FILIPPI*, Good Acoustical Quality in Restaurants: a Compromise Between Speech Intelligibility and Privacy,* International Conference on Acoustics - ICA 2004, Kyoto 4 - 9 aprile 2004

Siti internet

14. http//pcfarina.eng.unipr.it

CAPITOLO 7

LA SIMULAZIONE ACUSTICA

7.1 Acustica geometrica e modelli numerici

La progettazione o il riadattamento di una sala richiedono di prevedere una risposta acustica della stessa. Tuttavia la complessità dei fenomeni fisici in gioco, per qualunque forma e dimensione delle sale e con i vari oggetti e materiali presenti, comporta un approccio analitico impraticabile e perciò tale metodo risulta sconsigliato: un procedimento alternativo e un efficace ausilio alla progettazione, è offerto dai modelli di simulazione numerica che, con opportune semplificazioni, consentono di effettuare previsioni circa la risposta che l'ambiente oggetto di studio fornirà allo stimolo acustico. Inoltre con il continuo aumentare delle prestazioni dei computer e con l'evoluzione dei software e delle tecniche numeriche di soluzione dei modelli matematici, è possibile svolgere la maggior parte dell'analisi predittiva e diagnostica direttamente dalla propria postazione di lavoro e in tempi molto più brevi di una volta.

I modelli numerici, nonostante lavorino su esempi semplificati rispetto ai casi reali, offrono numerosi benefici: primo fra tutti la possibilità di utilizzare lo stesso modello di base per valutare rapidamente alternative di progetto sia in riferimento alla geometria, sia alle caratteristiche di assorbimento acustico e diffusione delle superfici; inoltre partendo da una semplice modellazione solida della sala, consentono di calcolare con varie tecniche, i descrittori oggettivi più importanti.

L'uso di software per la simulazione acustica si rivela quindi un efficace aiuto per la progettazione e rappresenta uno strumento insostituibile per valutare le qualità ambientali di una sala all'interno di un progetto ante operam.

Lo studio dei campi acustici attraverso simulazioni numeriche, può essere affrontato secondo diversi livelli di accuratezza, senza necessariamente falsare gli obiettivi di calcolo revisionale: infatti molti fenomeni complessi legati alla natura ondulatoria del suono (interferenza, diffrazione, ecc…) spesso non condizionano in maniera determinante il risultato, ed è possibile studiare il campo acustico secondo semplici leggi geometriche ottenendo così una notevole semplificazione del problema.

7.1.1 Metodo delle sorgenti virtuali

Nell'ambito dell'ottica geometrica, la riflessione della luce su di uno specchio viene trattata immaginando che il raggio riflesso provenga da una sorgente fittizia posta dietro lo specchio e che viene detta "immagine virtuale" della sorgente reale. La stessa cosa può essere estesa nell'ambito dello studio dell'acustica degli ambienti chiusi purché valgano le leggi dell'approssimazione geometrica e che le superfici della sala oggetto di studio siano lisce e grandi rispetto alle lunghezze d'onda in gioco.

Secondo questa ipotesi, nell'ambito dell'approssimazione geometrica e se le superfici dell'ambiente soddisfano le condizioni per la riflessione speculare, una qualsiasi onda sonora riflessa può essere pensata come se provenisse dall'immagine virtuale, posta dietro la superficie della sorgente reale ed infine può essere a sua volta considerata come un'onda diretta, originata però da una sorgente fittizia. Questo meccanismo può essere applicato poi a tutte le riflessioni successive alla prima: basta considerare come sorgente reale la sorgente virtuale della riflessione precedente.

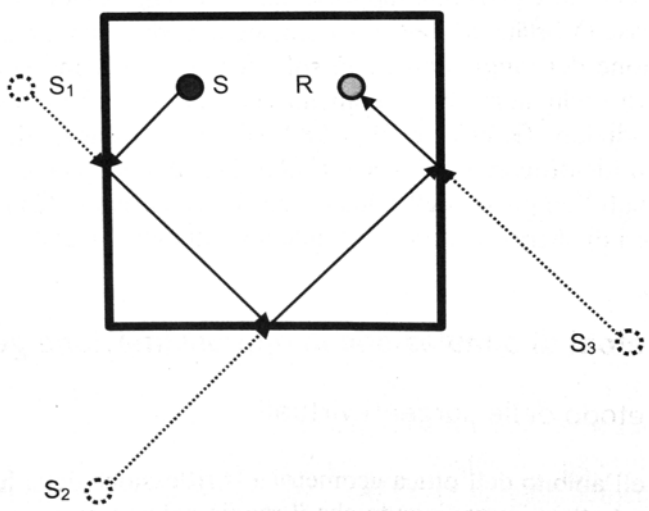


Fig. 7.1 - *Esempio di ricostruzione di una sorgente virtuale di terzo ordine.*

Da queste considerazioni sul fenomeno della riflessione dei raggi sonori, deriva la tecnica delle sorgenti virtuali, le cui ipotesi di base sono:

a) valgono le approssimazioni della acustica geometrica;
b) sulle superfici di contorno, il suono si riflette specularmene;

c) ad ogni riflessione speculare è associata una sorgente virtuale che si comporta in emissione come la sorgente reale dalla quale è originata;
d) ogni sorgente, reale o virtuale, emette fronti d'onda sferici;
e) la propagazione dei fronti d'onda sferici è descrivibile mediante raggi sonori che vanno dalla sorgente, reale o virtuale, al ricevitore;
f) la potenza sonora che giunge al ricevitore è pari a quella emessa dalla sorgente diminuita per effetto dell'assorbimento delle superfici e per l'attenuazione del suono nell'aria (Garai, Tavernelli, 2005)

Per applicare questo metodo inoltre occorre prestare attenzione a poche altre norme, note come criteri di visibilità: il punto di riflessione deve appartenere alla superficie di riflessione e il raggio non deve essere interrotto da altre superfici.

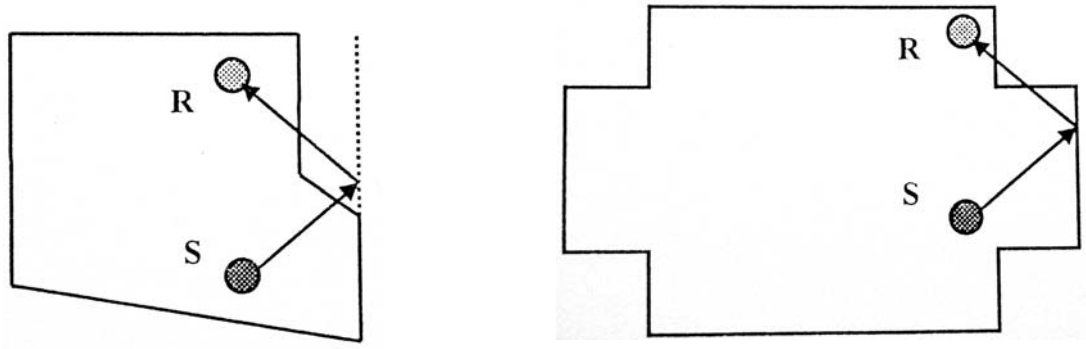


Fig. 7.2 - *I due criteri di visibilità*

Le informazioni ricavabili con questo metodo sono esaurienti per la caratterizzazione di un ambiente poiché è possibile determinare: la densità di energia sonora complessiva in regime stazionario; il livello sonoro in funzione della posizione e del tempo; l'intensità sonora monodirzionale in funzione della posizione e del tempo; tempi di ritardo e le direzioni di arrivo delle singole riflessioni. Da questi dati è possibile ottenere tutti quei risultati forniti in genere dall'acustica statistica e ricavare tutti i principali descrittori acustici

Il metodo delle sorgenti virtuali è deterministico e indiretto. Detrministico perché costruisce sistematicamente le sorgenti virtuali in funzione del numero delle riflessioni. Indiretto perché le riflessioni reali vengono sostituite da un insieme di sorgenti virtuali in campo libero. Sono note a priori le posizioni delle sorgenti e dei ricevitori, ma non le direzioni con cui vengono tracciati i raggi di ogni sorgente. L'algoritmo di calcolo deve eseguire, per ogni sorgente, ogni ricevitore, ogni superficie e ogni ordine di riflessione, un test di visibilità per controllare che il punto di riflessione appartenga alla superficie

di riflessione e che il raggio non sia interrotto da una superficie non coinvolta nella riflessione (Garai, Tavernelli, 2005).

7.1.2 Metodo del ray tracing

In questo metodo, anziché disperdersi su fronti d'onda sferici, come nel caso delle sorgenti virtuali, si ammette che l'energia sonora si propaghi nello spazio frazionata lungo traiettorie rettilinee o raggi sonori.

Ai raggi si applicano le leggi della approssimazione dell'acustica geometrica e quindi della riflessione speculare, inoltre valgono le seguenti ipotesi di base:

a) l'energia sonora della sorgente viene quantizzata in un numero finito di pacchetti associati a raggi sonori;
b) a partire dalla posizione della sorgente i raggi sonori si propagano in tutte le direzioni secondo le leggi dell'acustica geometrica;
c) i raggi sonori hanno una sezione idealmente infinitesima e costante;
d) i raggi sonori perdono energia per effetto dell'assorbimento delle superfici e dell'attenuazione del suono nell'aria;
e) in ricezione, i quanti di energia sonora associati ai diversi raggi si possono sommare tra loro (Garai, 2001).

Ogni sorgente viene caratterizzata dalla potenza sonora emessa e dal fattore di direttività: in questo modello equivale a scegliere il numero di raggi, la potenza e la direzione associata a ciascuno di essi.

La generazione dei raggi può avvenire secondo due diverse modalità: deterministica e statistica. Nella prima soluzione le direzioni di emissione sono individuate da vettori posizione di punti appartenenti alla superficie sferica della sorgente: i vettori sono scelti secondo regole geometriche di partizione ben precise. Nel secondo caso invece i vettori direzionali sono orientati in base a una coppia di numeri casuali in modo da assicurare una uniforme copertura della superficie della sfera unitaria. Con la generazione statistica l'uniformità della distribuzione dei raggi è garantita purché il numero dei raggi sia sufficientemente elevato: per raffinare i risultati di una simulazione basta quindi aumentare il numero di raggi.

In ognuno dei due casi, la potenza sonora assegnata in origine a ciascun raggio sonoro deve essere proporzionale alla potenza W e al fattore di direttività Q della sorgente, divisi per il numero di totale di raggi J_0.

I ricevitori non possono essere più puntiformi perché la possibilità di captazione di un raggio sarebbe pressoché nulla: sono rappresentati da volumi finiti corrispondenti alla zona di sensibilità dei ricevitori stessi. Di solito sono individuati da sfere di opportuno diametro dato che l'area efficace del ricevitore è, in qualunque direzione di incidenza, la stessa.

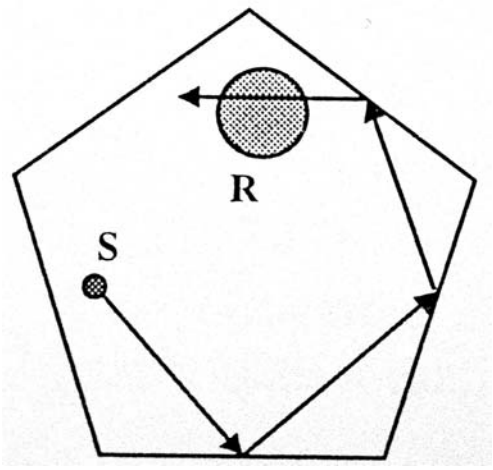


Fig. 7.3 – Procedura del r*ay tracing*

La potenza sonora che raggiunge un ricevitore viene determinata in successivi intervalli di tempo come somma di un gran numero di piccole quantità di potenza trasportate dai raggi che intercettano la relativa sfera di sensibilità. Per ciascun ricevitore, dividendo l'energia complessiva captata per il volume della sfera si calcola poi la densità di energia sonora e da essa il livello sonoro (Kuolowski, 1985; Stephenson, 1990).

Affinché i risultati siano statisticamente stabili, è indispensabile lanciare un numero molto elevato di raggi, in modo che coprano tutte le possibili direzioni nell'ambiente. In questo modo la precisione del modello aumenta con il crescere del numero di raggi emessi dalla sorgente così come il tempo di calcolo.

Il percorso di ognuno dei raggi lanciati continua finché non risulta soddisfatto uno dei seguenti criteri:

1. la potenza sonora residua convogliata dal raggio ha raggiunto un valore minimo prefissato;
2. l'ordine di riflessione del raggio ha raggiunto un valore massimo prefissato;
3. la lunghezza del percorso totale del raggio ha raggiunto un valore massimo prefissato;

4. il tempo di volo del raggio ha raggiunto un valore massimo prefissato (Garai, 2001).

L'obiettivo di questo metodo è, come quello delle sorgenti virtuali, quello di ricostruire in un determinato numero di punti le risposte della sala, dalle quali è poi possibile determinare i valori dei descrittori acustici.

7.1.3 I metodi ibridi

Il termine ibrido è utilizzato per descrivere quelle tecniche di simulazione che usano una combinazione del ray tracing e del modello delle sorgenti virtuali.

Poiché nel modello classico delle sorgenti virtuali ben poche sorgenti costruite sono effettivamente visibili, alcuni studiosi hanno proposto, invece del test di visibilità, che è sempre piuttosto lungo e oneroso da realizzare, una indagine sulla reale sequenza di ogni raggio mediante l'aiuto del ray tracing: in questo modo si ha l'ordine esatto con cui le superfici di riflessione vengono colpite per cui risulta immediata la ricostruzione della sequenza delle sorgenti immagine. In seguito si abbandona il modello ray tracing per valutare la risposta della sala con il contributo delle varie sorgenti immagine.

Un'altra procedura di simulazione del campo acustico in un ambiente chiuso è quella nota come *cone tracing:* questo metodo prevede la sostituzione dei raggi sonori uniformemente distribuiti attorno alla sorgente (tipici del ray tracing) con dei coni, ovvero dei fasci divergenti i cui assi coincidono con i raggi originari. In seguito alla riflessione il vertice del cono coincide con una sorgente virtuale associata alla relativa superficie di incidenza.

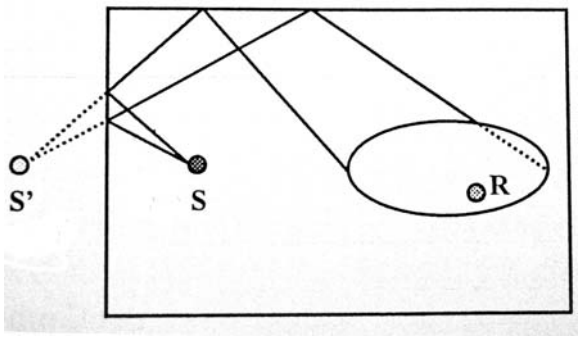


Fig. 7.4 - *Procedura del cone tracing*

I ricevitori sono anche in questo caso puntiformi e l'evento si registra quando vengono attraversati dalla sezione di cono.

Il vantaggio di questo metodo consiste nel portare un netto miglioramento delle prestazioni, permettendo di eliminare le incertezze dovuto al carattere statistico dei

raggi. Ciò implica però anche un problema: la copertura delle superfici con i raggi conici porta ad avere delle zone di evidente sovrapposizione che portano a sovrastimare gli effetti.

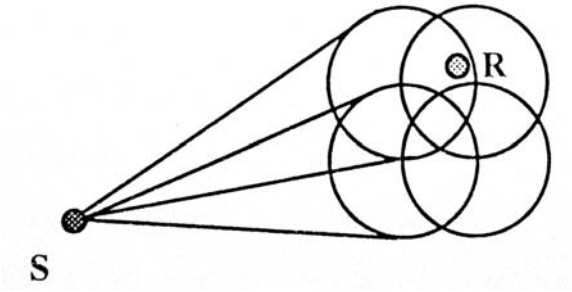


Fig. 7.5 - *Sovrapposizione dei fasci*

Una ulteriore soluzione che risolve il problema della sovrapposizione dei coni circolari si basa sulla possibilità di suddividere esattamente una superficie sferica in triangoli curvilinei: questo metodo è noto come *piramid tracing*.

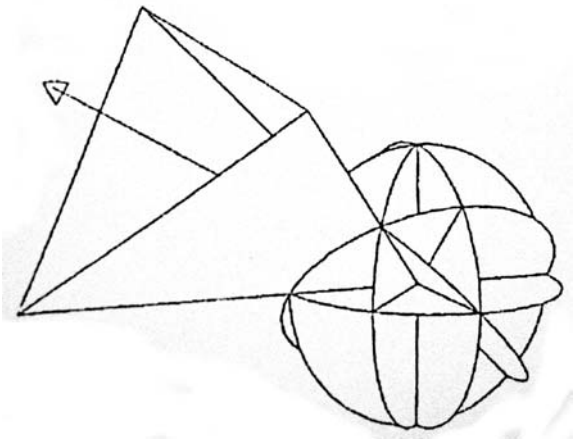


Fig. 7.6 - *Emissione di fasci piramidali divergenti*

7.2 Metodologia di simulazione con Odeon

In questo lavoro è stato utilizzato ODEON Version 6.0 come software di simulazione acustica.

Il programma si basa sulle leggi dell'acustica geometrica. La sala viene considerata come composta da superfici piane che hanno la proprietà di assorbire energia in base al proprio coefficiente di assorbimento considerato indipendente dall'angolo di incidenza.

La simulazione viene suddivisa in due fasi, nelle quali vengono trattate rispettivamente le prime riflessioni e le riflessioni successive: in accordo con il metodo ray tracing, viene utilizzato un tracciamento di raggi per trovare la posizione delle sorgenti

immagine; quelle che si trovano entro una certa distanza dalla sorgente sono controllate per determinare se forniscono un contributo al ricevitore (test di visibilità); le immagini che si trovano ad una distanza maggiore sono trattate statisticamente per generare un decadimento riverberante il più possibile realistico.[1]

7.2.1 Prime riflessioni

Il primo passo effettuato dal software è quello di tracciare dei raggi sonori che saranno emessi da una sorgente. Il numero dei raggi è sempre stabilito dall'utente: maggiore è il numero dei raggi lanciati migliore sarà la precisione e l'accuratezza del modello. La direzione invece dipende dal tipo di sorgente utilizzata.

In un primo momento il programma di simulazione utilizza i raggi per scoprire le sorgenti immagine: ogni volta che un raggio colpisce una superficie viene determinata una sorgente immagine e i dati relativi sono immagazzinati in un apposito file. Successivamente per ogni potenziale sorgente immagine viene realizzato il visibility check (test di visibilità). Per verificare che la sorgente sia realmente visibile dal ricevitore, il percorso tra l'immagine e il ricevitore deve attraversare tutte le superfici coinvolte nella generazione dell'immagine stessa e non altre. La verifica viene realizzata tracciando un raggio a ritroso dal ricevitore alla sorgente (back tracing).

Poiché le sorgenti possono essere colpite da più di un raggio, è necessario assicurarsi che ciascuna immagine valida sia accettata solo una volta per evitare di avere riflessioni doppie. Per questo motivo Odeon verifica se la visibilità dell'immagine così definita è stata precedentemente determinata; se così avviene, non permette che il processo venga ripetuto e l'immagine viene saltata.

Si può applicare una forma di diffusione permettendo ai raggi di divergere dalle loro riflessioni speculari oltre un prefissato ordine di riflessione. La probabilità di questa divergenza è affidata ad un coefficiente di diffusione assegnato ad ogni superficie.

7.2.2 Late reflection

L'utente deve individuare un particolare ordine di riflessione, detto ordine di transazione (transition order), oltre il quale si ha il passaggio dal metodo delle sorgenti

[1] A. RICCARDI, *Applicazione di software si simulazione numerica in acustica architettonica. La sala conferenze del Museo Regionale di Scienze naturali in Torino*, Politecnico di Torino, Facoltà di Architettura, Relatori: Prof. Marco Filippi, Arch. Arianna Astolfi, A.A 2001-2002

immagine a quello delle sorgenti secondarie. Oltre il transition order, ogni volta che un raggio colpisce una superficie viene generata una sorgente secondaria di tipo diffondente. La direzione di riflessione viene determinata mediante complesse funzioni sulla base del coefficiente di diffusione assegnato alla superficie.

7.3 Procedura di modellazione acustica con Odeon

7.3.1 Modellazione 3D

La modellazione della sala va realizzata mediante i comuni programmi CAD per poi esportare il file nel formato dxf (drawing exchange file). Per ridurre i tempi di calcolo è importante realizzare un modello tridimensionale piuttosto semplificato. Infatti si possono trascurare tutti quei particolari che, come rientranze o sporgenze di profondità minima, inferiori quindi alla lunghezza d'onda dei suoni percepiti, non hanno influenza sull'acustica dell'ambiente oggetto di studio.

Il modello per poter essere importato in Odeon dovrà essere costituito da 3Dface con i vertici coincidenti e dovrà essere perfettamente chiuso, a tenuta stagna, per evitare la fuoriuscita di raggi.

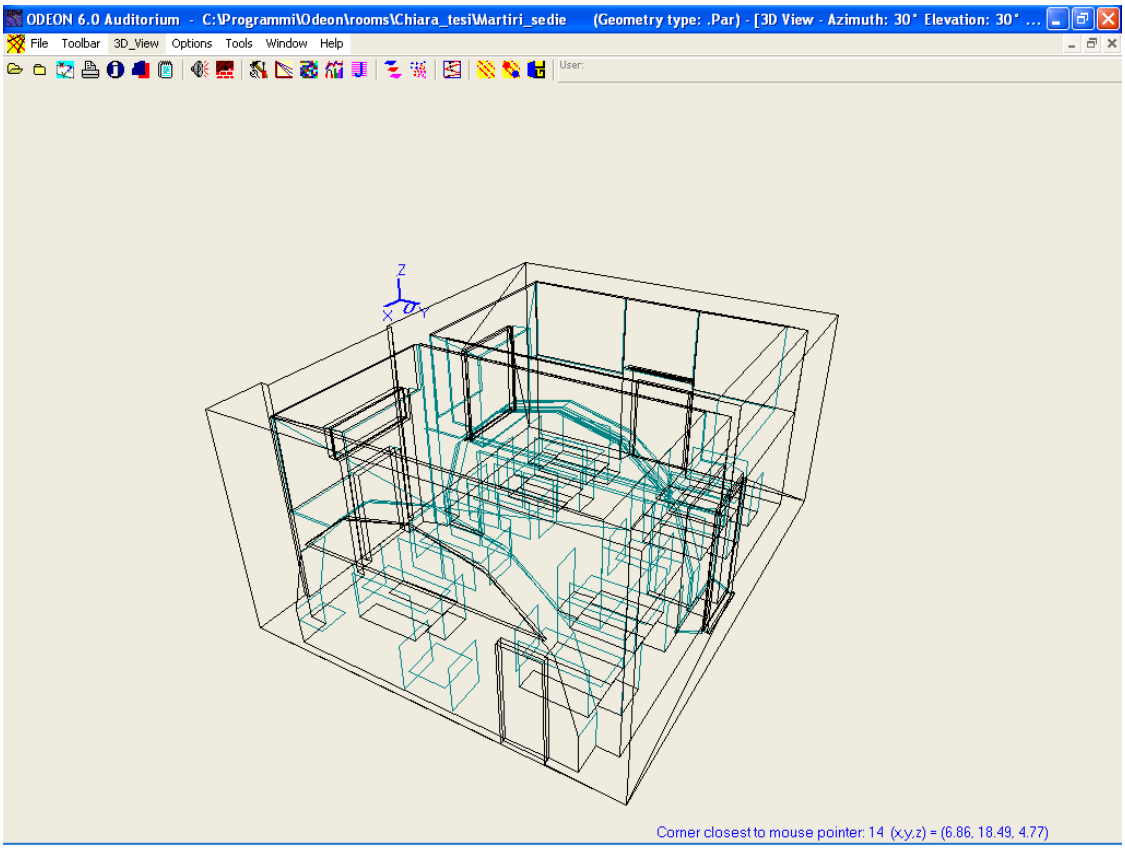


Fig. 7.7 - *Modello 3D importato in Odeon*

Dato che la successiva fase di assegnazione dei coefficienti di assorbimento può risultare laboriosa, soprattutto per modelli con numerose superfici, è opportuno suddividere, già dal principio, le superfici dei vari materiale in più layer.
Una ulteriore semplificazione è quella di considerare alcuni oggetti di arredo, come per esempio le poltrone di un auditorium, come delle semplici superfici

7.3.2 Assegnazione dei coefficienti di assorbimento

Il programma richiede di assegnare ad ogni superficie un materiale che sarà caratterizzato da valori di assorbimento acustico per le frequenze in banda d'ottava comprese tra 63 Hz a 8000 Hz. I materiali sono catalogati all'interno di una libreria già presente nel software ed ma è possibile inserire nuove soluzioni adatte al proprio ambiente.

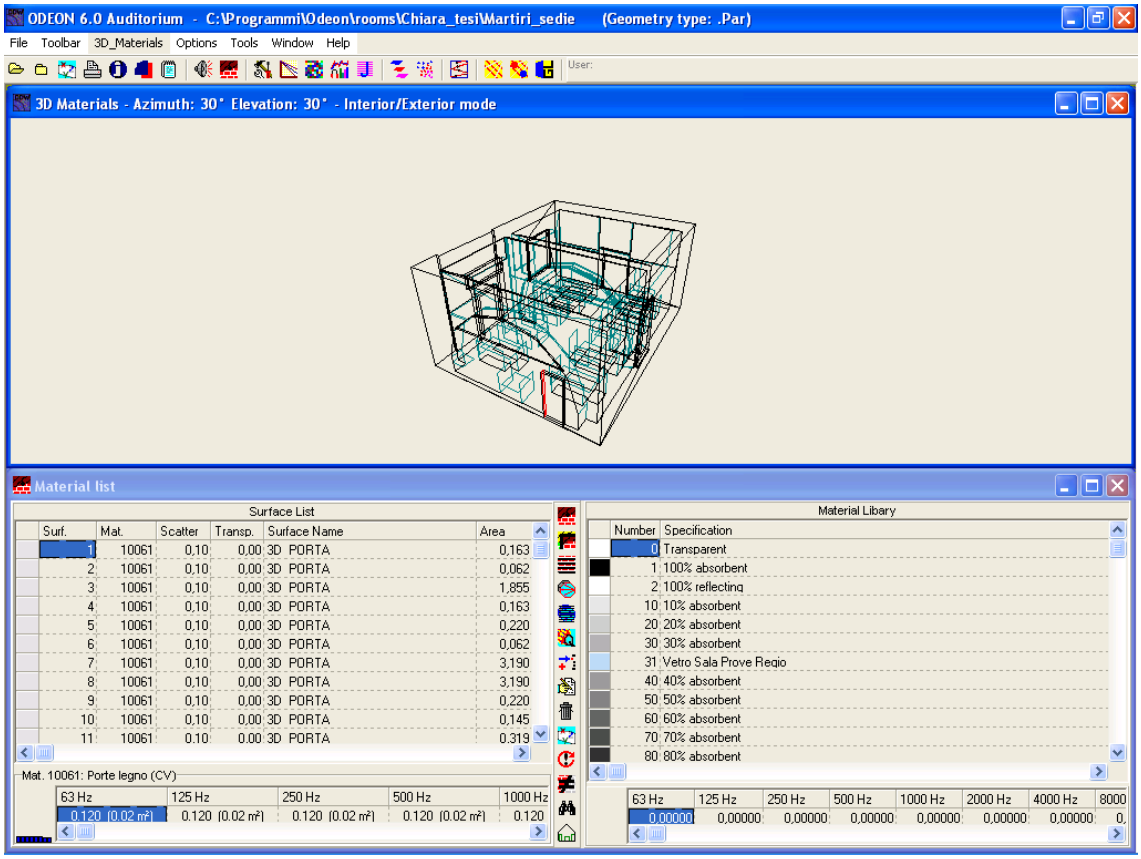


Fig. 7.8 - *Assegnazione dei coefficienti di assorbimento*

L'assegnazione dei materiali avviene semplicemente selezionando le superfici sulla destra e associando a queste il rispettivo materiale sulla sinistra dello schermo.
Odeon richiede anche la determinazione dei coefficienti di diffusione (*scatter*): in questa tesi è stato utilizzato un coefficiente di 0.1 considerando le pareti come lisce.

È possibile controllare l'esattezza dei dati inseriti attivando una funzione (3DopenGL) attraverso la quale è possibile verificare la vista interna del modello: a ciascuna superficie viene assegnato un colore che corrisponde al materiale assegnato. I colori più chiari corrispondono a superfici poco assorbenti, al contrario colori più scuri rappresentano superfici più assorbenti.

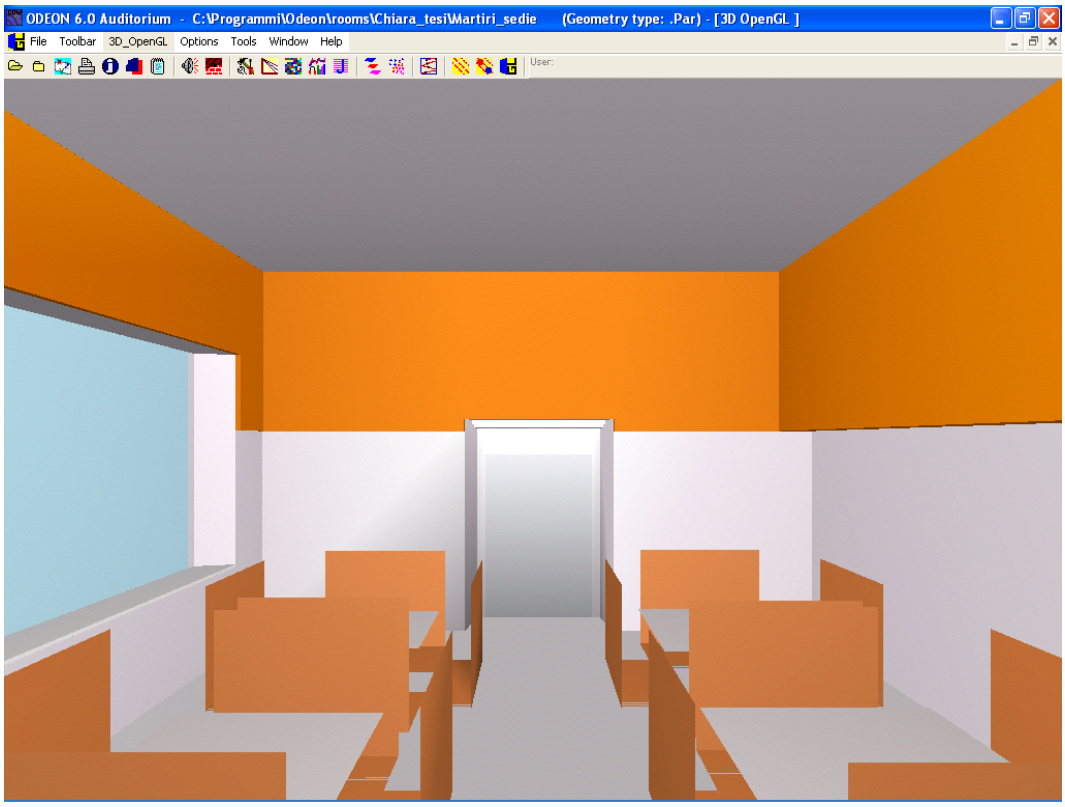


Fig. 7.9 - *Vista interna dell'ambiente della simulazione*

7.3.3 Sorgenti e ricevitori

Per prima cosa va individuata la sorgente da collocare: la scelta dipende dallo spettro di emissione desiderato. In questo lavoro, trattandosi di uno studio sull'intelligibilità della parola, è stata scelta la sorgente che simula la voce umana con sforzo vocale forte o normale in base alla prova da lanciare.

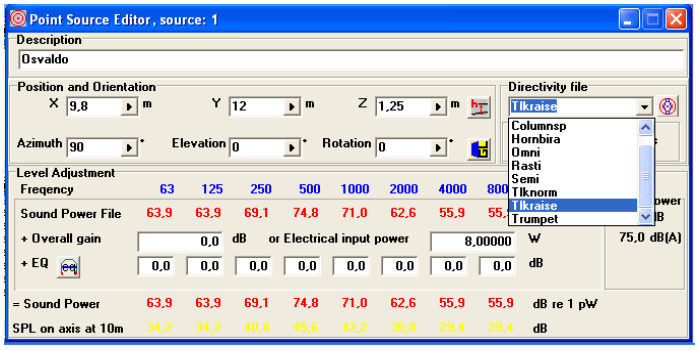


Fig. 7.10 - *Dati da inserire per collocare le sorgenti sonore*

Ad ogni sorgente e ad ogni ricevitore devono essere assegnate le coordinate (x, y, z), corrispondenti alla posizione scelta all'interno del modello.

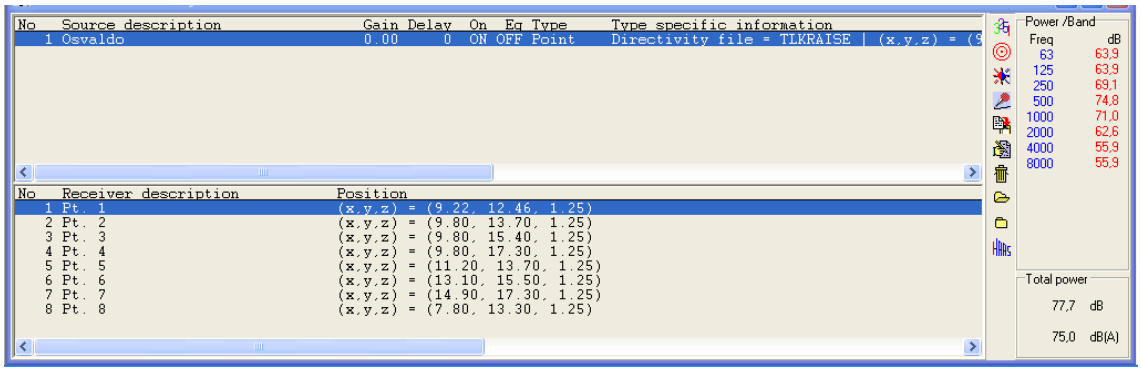


Fig. 7.11 - *Posizione delle sorgenti e dei ricevitori*

7.3.4 Griglia

Odeon consente di realizzare una mappatura dei diversi parametri acustici. È importante definire su quale superficie venga realizzata la griglia sulla quale verranno calcolati gli indici richiesti.

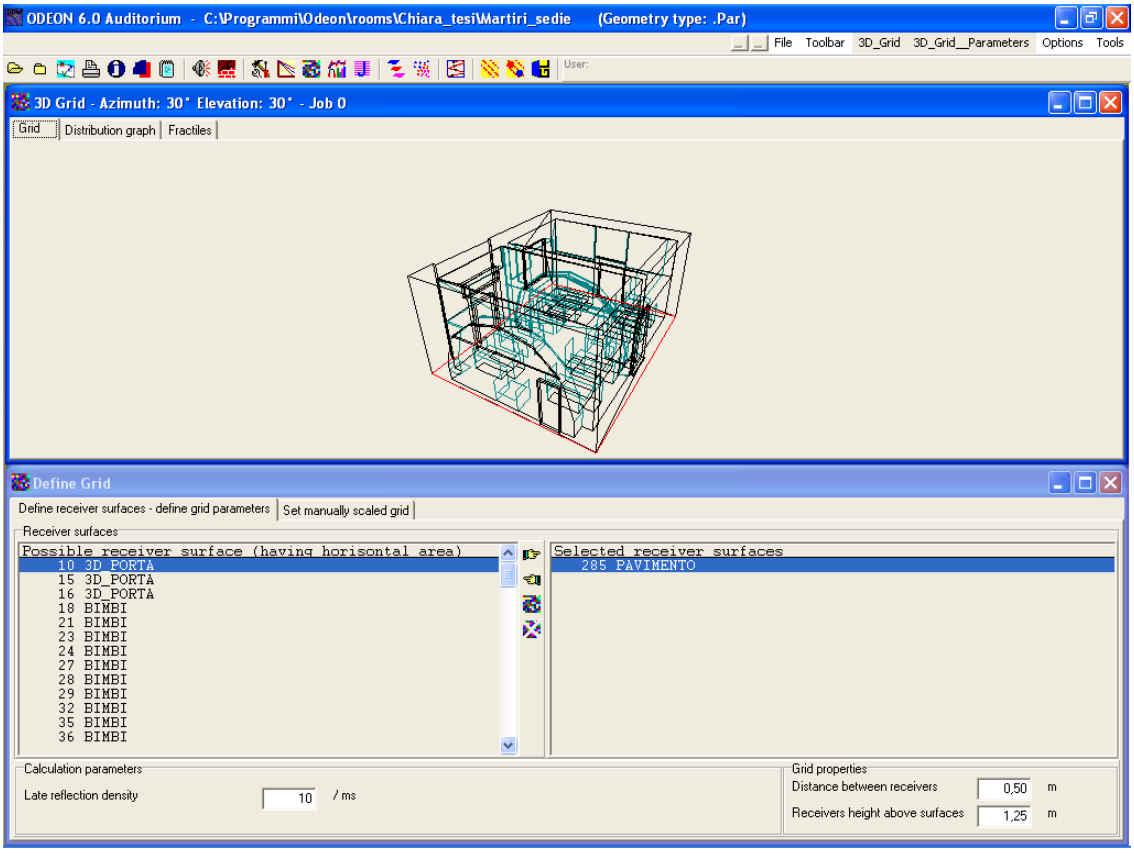


Fig. 7.12 - *Impostazione della griglia di calcolo*

Una volta stabilita la superficie sulla quale realizzare la mappa si deve determinare la dimensione delle maglie della griglia stessa e studiare la distanza in tra il piano su cui viene disegnata la griglia e le superfici scelte come tale.

7.3.5 Parametri di calcolo

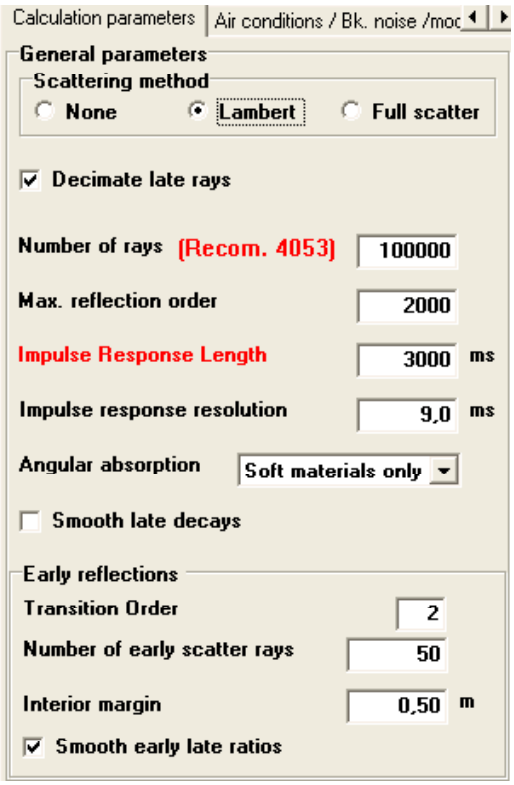


Fig. 7.13 - *Calculation parameters*

I parametri da inserire per effettuare la simulazione sono molti. Innanzi tutto si deve richiamare la *set room* che richiede alcuni dati fondamentali per lanciare un modello che abbia risultai precisi e accurati. In dettaglio, sono richiesti:

1. *Number of rays*: come già accennato, maggiore è il numero di raggi emessi dalla sorgente, migliore sarà la precisione dei risultati del modello. In questo lavoro è stato imposto che ogni sorgente lanciasse 100000 raggi;
2. *Impulse response resolution*: è consigliato un valore inferiore a 10 *ms;*
3. *Impulse response length*: il valore deve essere comparabile con il tempo di riverberazione.

Il tempo di riverberazione si può stabilire in modi differenti: o ci si affida ai valori misurati, se si sono effettuate rilievi sperimentali; nel caso di una simulazione di progettazione, ci si può affidare ad un comando chiamato *quick estimate*, presente nel

settore di assegnazione dei materiali, che offre in un'unica videata il confronto tra i valori del tempo di riverberazione con le formule dell'acustica statistica (Sabine, Eyring, Arau-Puchades); oppure si può ricorrere al comando *Global extimate* che consente di visualizzare i valori di T_{30} e T_{20} calcolati non più secondo le formule dell'acustica statistica ma in base al metodo ray tracing.

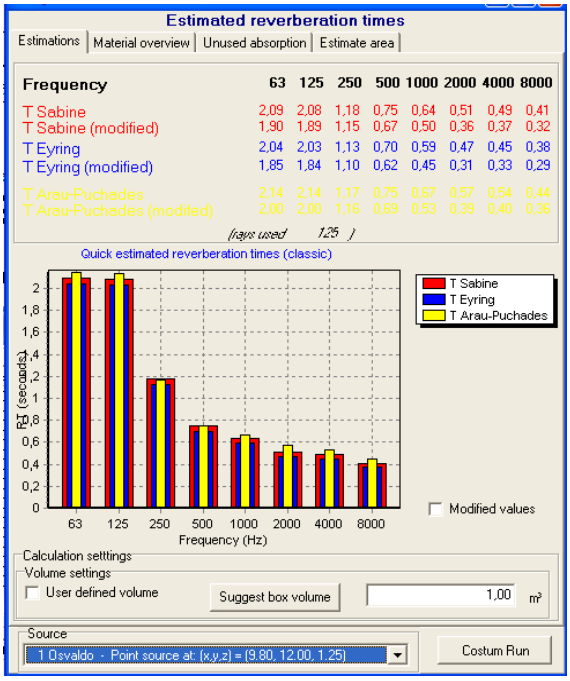


Fig. 7.14 - *Quick estimate*

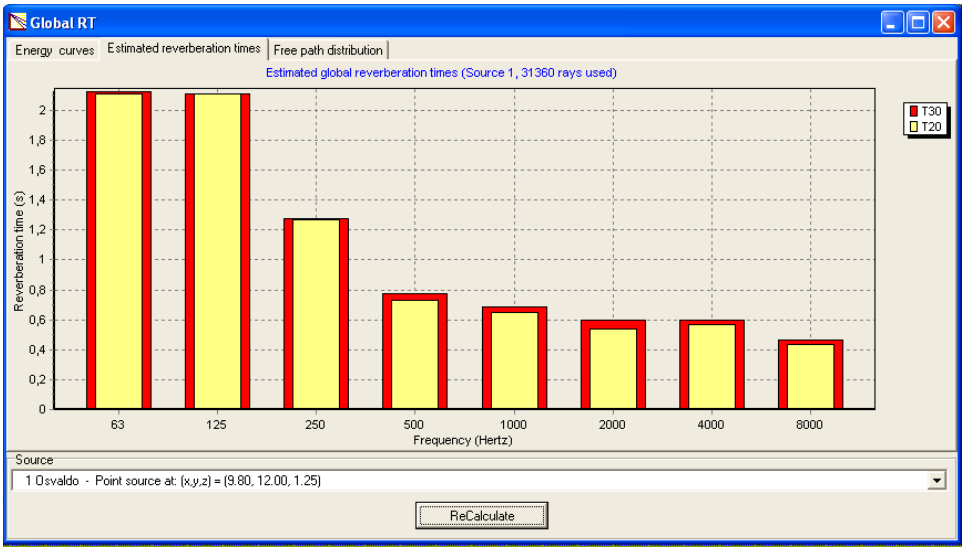


Fig. 7.15 - *Stima del tempo di riverberazione*

4. *Max reflection order:* deve essere il Massimo possible ma in ogni caso le riflessioni si fermeranno in funzione della lunghezza della risposta all'impulso;
5. *Transition order*: il valore è in funzione del numero di superfici del modello (cfr. manuale di Odeon) ma non si dovrebbe superare l'ordine pari a 4 se non per particolar studi;
6. *Scattering method*: va selezionato il metodo Lambert. Tutte le direzioni delle late reflection saranno calcolate in funzione del coefficiente di diffusione applicato alle superfici. Per esempio se il coefficiente di riflessione è 1 la direzione del raggio riflesso sarà calcolata secondo una direzione casuale che segue la distribuzione angolare di Lambert della riflessione ideale diffusa $\sin 2\theta$. Per coefficienti di diffusione tra 0 e 1 la nuova direzione sarà calcolata come direzione pesata tra la direzione sarà calcolata come direzione pesata tra la direzione speculare e la direzione diffusa casulae (per esempio con 0.1 sarà 90% speculare e 10% diffusa).
   Per superfici larghe e piane è consigliato un coefficiente di diffusione pari a 0.1 e per superfici altamente irregolari, come per esempio l'area occupata dalle poltrone in una platea, è consigliato u coefficiente di diffusione pari a 0.7. Per superfici perfettamente riflettenti e consigliato un coefficiente di riflessione pari a 0.02.
7. *Smooth late decays*: è settato su off di default e serve solo per migliorare visivamente la coda sonora.
8. *Desidered late reflection density*: determina la densità d riflessioni che Odeon cercherà di raggiungere nell'ultima porzione di decadimento. Maggiore è la densità, minore sarà la possibilità che siano presenti riflessioni distanziate e dunque udibili singolarmente nella coda sonora. Un valore di 100 *ms* è di solito sufficiente. Per ottenere la massima densità possibile è necessario spegnere l'opzione *Decimate late rays* e alzare il valore della densità desiderata. Per i calcoli su una griglia di punti è possibile modificare tale parametro nella *Design Grid Page*, al fine di velocizzare i calcoli.
9. *Decimate late rays*: se l'opzione è selezionata, dopo il transiction order sono tracciati un numero inferiore di raggi rispetto al nu mero settato in partenza. Sarà comunque un numero di raggi sufficiente a garantire una esatta stime della coda riverberante. Si accende per diminuire i tempi di calcolo.

10. *Number of early scatter rays:* sono il numero di raggi lanciati dalla sorgente secondaria ottenuta dalle sorgenti immagine relative alle prime riflessioni. Il valore consigliato è 100 ma può essere alzato anche fino a 400.[2]

Dopo aver inserito i parametri si può lanciare la simulazione. Nella pagina *Job list* viene richiesto di selezionare e quindi accendere le sorgenti e i relativi ricevitori e di far partire le rispettive sezioni di calcolo che saranno tanto numerose quanti sono i ricevitori.

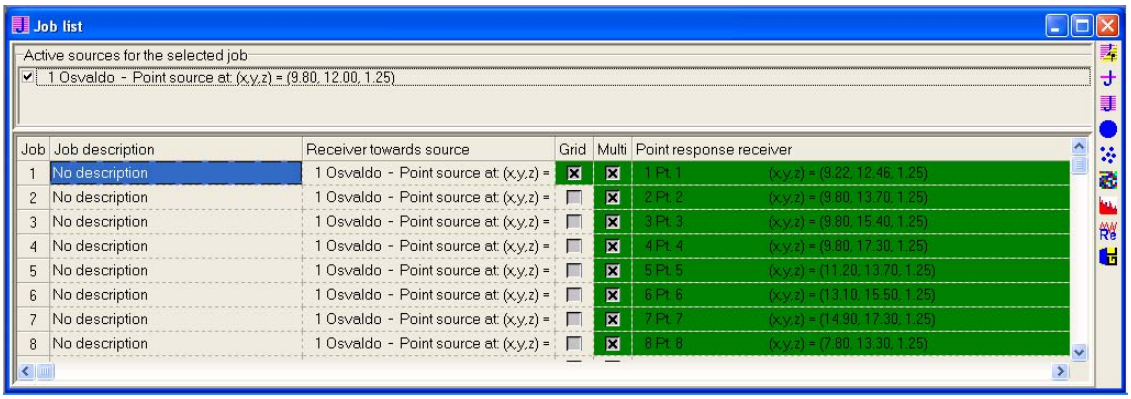


Fig. 7.16 - *Job list*

Al termine della simulazione i risultati sono restituiti in forma grafica (*Grid Response*) oppure i dati sono organizzati in tabelle (Multi point Response) e suddivise per ogni ricevitore inserito.

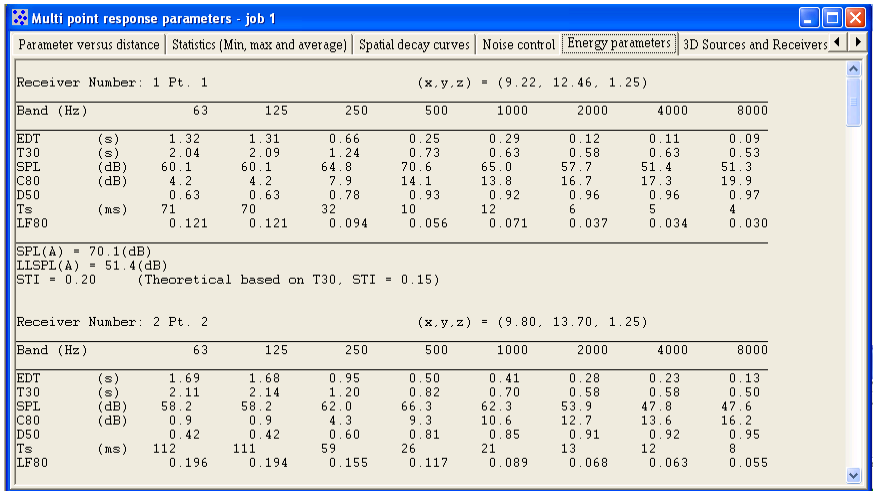


Fig. 7.17 - *Multi point response parameters*

[2] A. RICCARDI, *Applicazione di software si simulazione numerica in acustica architettonica. La sala conferenze del Museo Regionale di Scienze naturali in Torino*, Politecnico di Torino, Facoltà di Architettura, Relatori: prof. Marco Filippi, arch. Arianna Astolfi, A.A 2001-2002

7.4 Bibliografia

1. S. CINGOLANI, R. SPAGNOLO, *Acustica musicale e architettonica*, Torino, UTET, 2005
2. Odeon Room Acoustics Program Version 6.0, Industrial, Auditorium and Combined editinon, *User Manual,* 2002
3. R. SPAGNOLO, *Manuale di Acustica*, Torino, UTET, Marzo 2001
4. AA.VV., *Corso di formazione in Acustica Applicata – Torino, maggio - giugno 1999*, Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris – Laboratorio di Acustica, Torino, 1999

Tesi di laurea

5. S. LEVORIN, *Studio acustico di auditorium scolastici*, Politecnico di Torino, I Facoltà di Architettura, relatore: prof. Marco Filippi, arch. Arianna Astolfi, A.A 2002-2003
6. A. RICCARDI, *Applicazione di software di simulazione numerica in acustica architettonica. La sala conferenze del Museo Regionale di Scienze naturali in Torino*, Politecnico di Torino, Facoltà di architettura, relatore: prof. Marco Filippi, arch. Arianna Astolfi, A.A. 2001/2002

Articoli

7. A. FARINA, *Metodologie di misura e valutazione* – AES seminario 2001
8. A.ASTOLFI, M. FILIPPI*, Good Acoustical Quality in Restaurants: a Compromise Between Speech Intelligibility and Privacy,* International Conference on Acoustics - ICA 2004, Kyoto 4 - 9 aprile 2004

Siti internet

9. www.pcfarina.eng.unipr.it

CAPITOLO 8

PROGETTAZIONE E SIMULAZIONE

8.1 Il caso studio

In questo lavoro si è scelto di verificare attraverso l'uso di Odeon l'ambiente acustico di una sola delle tre mense oggetto di studio. Le diverse simulazioni di questa tesi sono state realizzate per il refettorio della "Scuola Elementare Solaro": la scelta è stata fatta in base alle dimensioni ridotte del modello. Infatti le simulazioni condotte con molte sorgenti hanno l'inconveniente di essere piuttosto lunghe: l'uso di un modello di dimensioni ridotte ha permesso di ridurre i tempi di lavoro, anche se alcune prove hanno toccato le 7 ore di elaborazione.

8.1.1 La taratura del modello

Il primo passo è quello di procedere alla taratura del modello e cioè di verificare che le risposte acustiche dell'ambiente simulato siano il più possibili vicine a quelle riscontrate nella campagna di misure.

La simulazione è stata realizzata, secondo la procedura descritta nel capitolo precedente, posizionando una sorgente nello stesso punto in cui si trovava il manichino durante le misure; lo stesso trattamento è stato riservato ai ricevitori che invece ricalcavano le diverse posizioni del microfono.

I valori ottenuti nelle prime prove si discostavano da quelli misurati in quanto si riscontrava sempre un tempo di riverberazione troppo elevato rispetto alla condizione reale. Il passaggio successivo è stato quello di cercare e quindi assegnare dei coefficienti di assorbimento differenti fino a quando non si è trovata la combinazione esatta per la quale i risultati del tempo di riverberazione sono stati più attendibili.

Effettuata la calibrazione del modello, le indagini sono continuate in modo da realizzare un ulteriore tipo di taratura: si voluto verificare quanti bambini, dei 40 presenti, stavano parlando al momento della misura. Procedendo per tentativi, provando cioè a diminuire il numero di sorgenti attive all'interno del modello e confrontando il livello di pressione sonora del rumore di fondo misurato con quello ricavato dalle simulazioni, è stato possibile stimare che dei 40 bambini presenti in sala circa il 60% stava parlando con uno sforzo vocale elevato emettendo un livello di pressione sonora globale di 79,5 dB.

Il modello così tarato è stato utilizzato come base di confronto per tutte le successive simulazioni.

Nelle tabelle sottostanti è inserito il livello di pressione sonora emesso, nel modello di simulazione, da 24 bambini che parlano con sforzo vocale elevato in confronto con i dati realmente misurati

L_p Modello di taratura		Dati rilevati durante le misure	
Globale	79,5	Globale	80,1

Tab. 8.1 - *Confronto tra i Livelli di pressione sonora*

Il successivo passaggio prevede, sulla base dei dati determinati con il modello tarato, di determinare l'intelligibilità al tavolo utilizzando una sorgente che simuli lo sforzo vocale elevato. Anche questa simulazione è importante come confronto per i successivi lavori.

Per ogni calcolo dello STI i ricevitori sono stati posti ogni volta negli stessi punti intorno al tavolo in modo da avere valori sempre confrontabili.

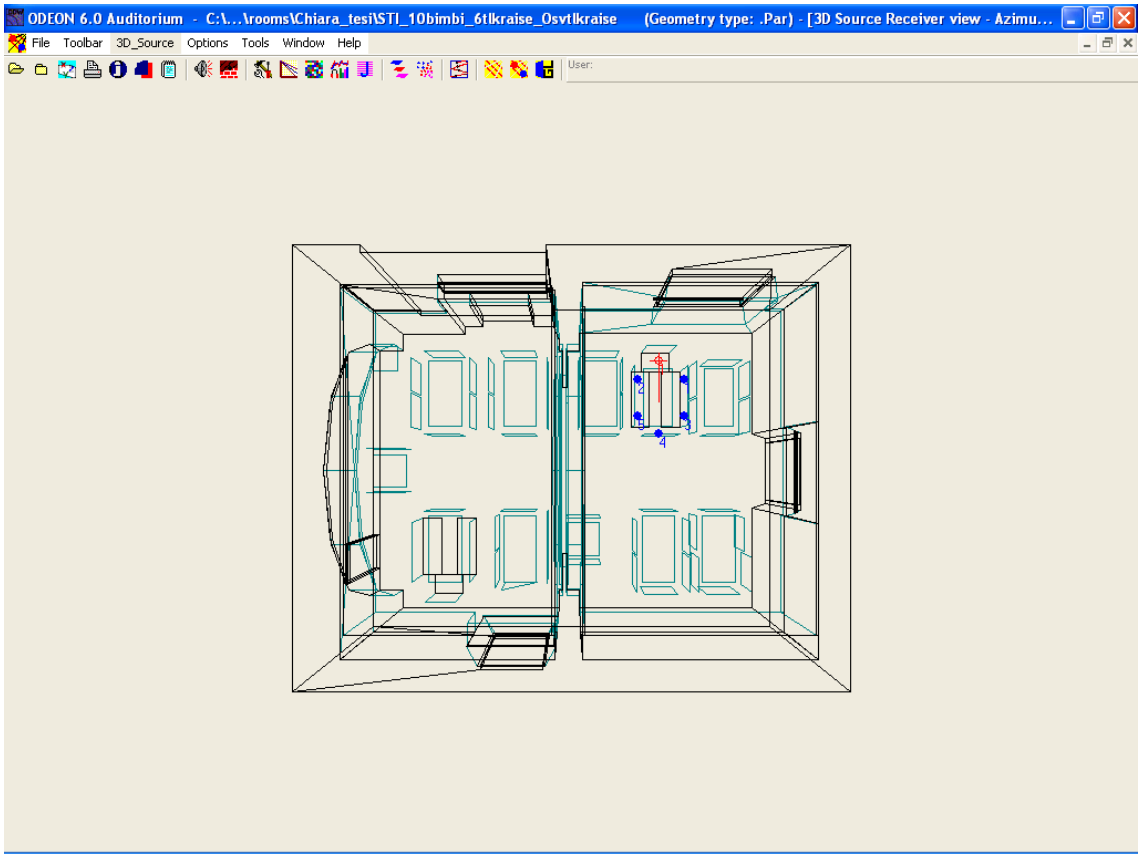


Fig. 8.1 - *Posizione della sorgente e dei ricevitori per il calcolo dello STI*

STI – Modello di taratura				
R1	R2	R3	R4	R5
0,28	0,29	0,18	0,16	0,15

Tab. 8.2 - *STI calcolato nei punti intorno al tavolo*

8.1.2 La ricerca della densità ottimale

Come già accennato, la densità di occupazione è un parametro fondamentale nello studio della bontà acustica di una mensa.

Lo studio si è successivamente spostato nel capire quale fosse la densità di occupazione ottimale: le simulazioni sono state realizzate riducendo il numero di occupanti della mensa.

Ammettendo che la percentuale di sorgenti fosse sempre il 60% dei presenti, le prove sono andate avanti simulando situazioni con un numero di bambini presenti sempre minore: il primo modello con 30 studenti , il secondo con 20 bambini, il terzo con 15 e l'ultimo con 10.

Per ognuna di queste situazioni sono state realizzate due diverse prove: una prima per ottenere il livello di pressione sonora emesso dalle relative sorgenti e, utilizzando come rumore di fondo questi dati ricavati, una seconda per determinare lo STI.

Man mano che si procede, si arriva alla conclusione che, in una sala di queste dimensioni, per ottenere una discreta intelligibilità al tavolo, ci dovrebbero essere non più di 10 bambini (e di questi 6 che parlano con sforzo vocale elevato).

Nella simulazione 6 bambini che parlano con sforzo vocale elevato emettono un livello di pressione sonora globale pari a 73,9 dB.

Livello di pressione sonora – 10 bambini presenti e 6 sorgenti attive [dB]							
Frequenze							globale
125	250	500	1000	2000	4000	8000	
64,6	67,5	70,7	65,7	56,5	49,9	49,0	73,9
Livello di pressione sonora – 40 bambini presenti e 24 sorgenti attive [dB]							
Frequenze							globale
125	250	500	1000	2000	4000	8000	
70,3	73,2	76,2	71,3	62,2	55,5	54,8	79,5

Tab. 8.3 - C*onfronto dei livelli di pressione sonora*

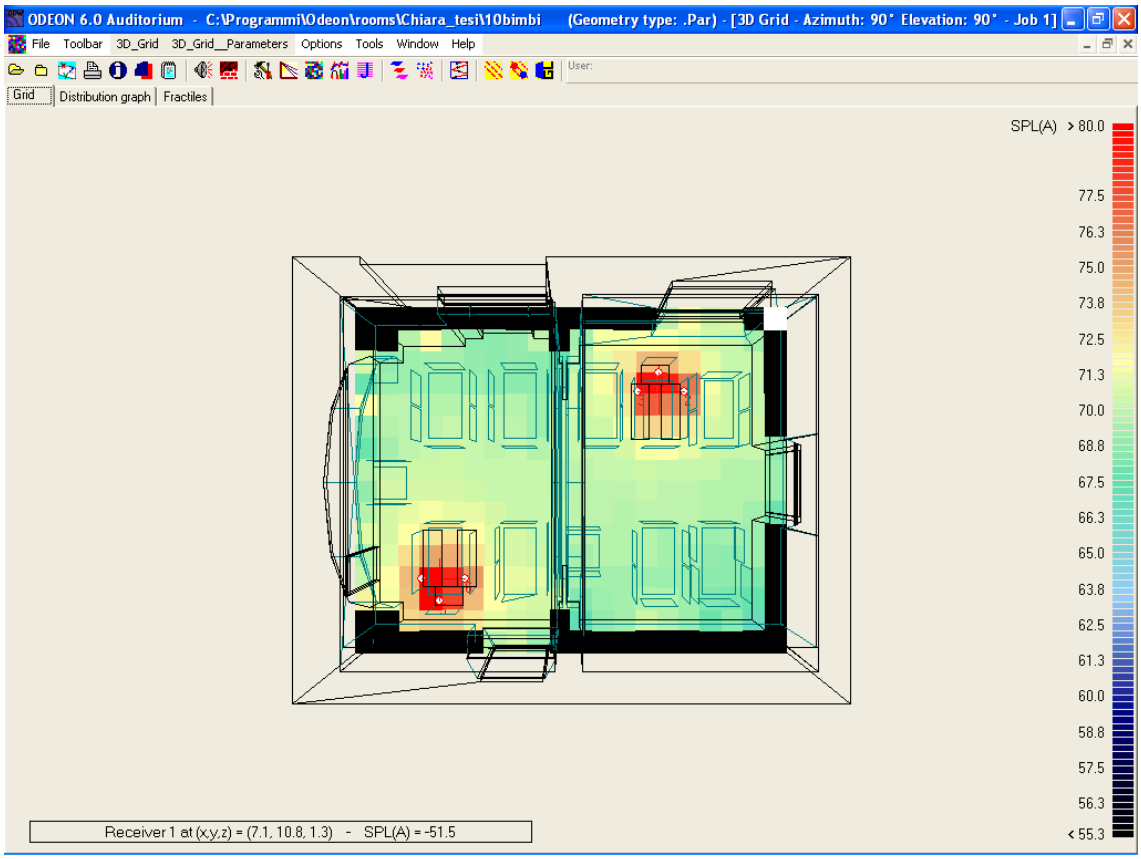


Fig. 8.2 - *SPL(A) prodotto da 6 sorgenti con sforzo vacale elevato*

L'indice di intelligibilità STI è stato misurato a partire dal livello di pressione sonora così calcolato. La sorgente e i ricevitori sono stati posizionato come nel modello tarato in modo da rendere confrontabili i risultati.

Modello con 40 bambini presenti e 24 sorgenti attive con sforzo vocale elevato				
Sorgenti /ricevitori	x	y	z	STI
Sorgente	9,8	12	1,25	/
R1	9,2	12,46	1,25	0,28
R2	10,3	12,46	1,25	0,29
R3	9,22	13,3	1,25	0,18
R4	9,8	13,7	1,25	0,16
R5	10,3	13,3	1,25	0,16

Modello con 10 bambini presenti e 6 sorgenti attive con sforzo vocale elevato				
Sorgenti /ricevitori	x	y	z	STI
Sorgente	9,8	12	1,25	/
R1	9,2	12,46	1,25	0,46
R2	10,3	12,46	1,25	0,47
R3	9,22	13,3	1,25	0,36
R4	9,8	13,7	1,25	0,33
R5	10,3	13,3	1,25	0,35

Tab. 8.4 - *Valori dello STI del modello tarato e di quello con 6 sorgenti attive*

I valori importanti sono quelli dei ricevitori R1 ed R2 che rappresentano l'indice STI calcolato ad 1 m di distanza dalla bocca della sorgente: entrambi sono sinonimo di una discreta intelligibilità della parola.

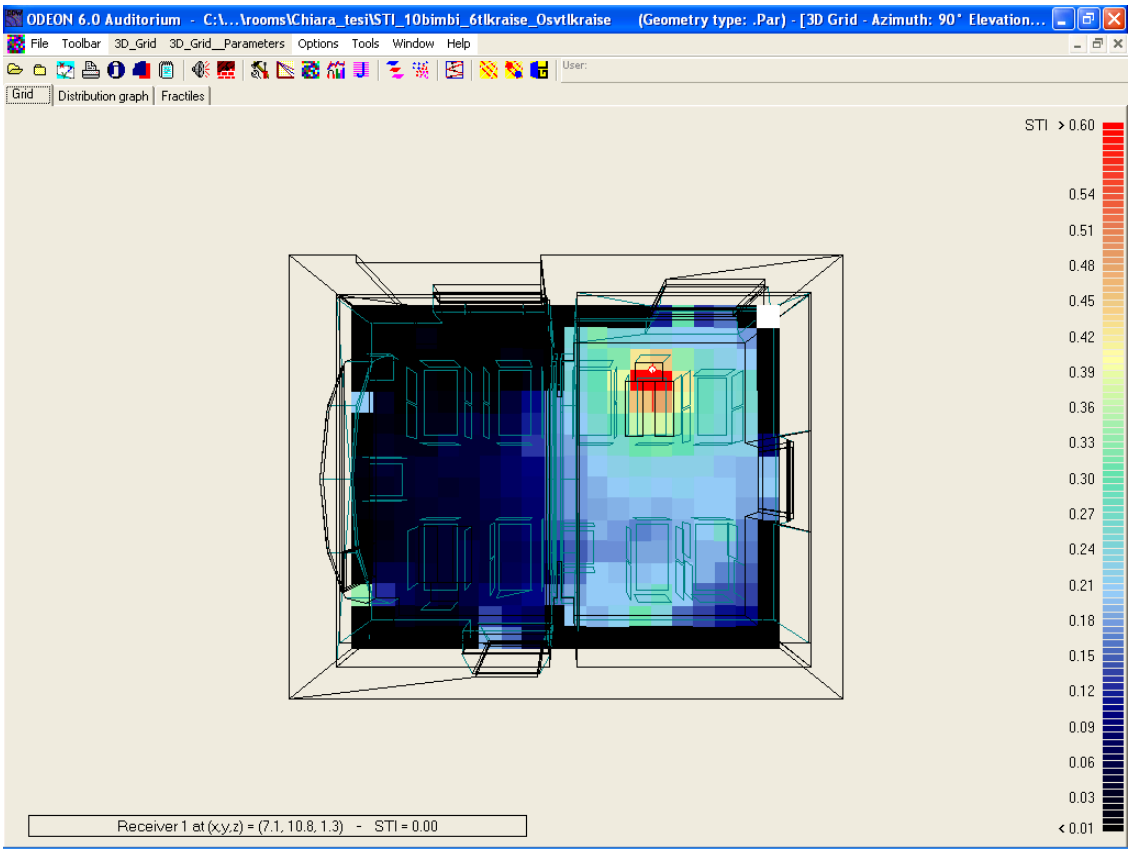


Fig. 8.3 - *Raffigurazione spaziale dell'indice STI nella situazione creata da 6 sorgenti che parlano con sforzo vocale forte*

In questa serie di simulazioni si capisce chiaramente come, all'interno di una simile mensa scolastica, l'intelligibilità della parola sia fortemente condizionata dal rumore di fondo più ancora del tempo di riverberazione. Procedendo con il lavoro, diminuendo quindi il numero di bambini presenti, il livello di pressione del rumore di fondo si è abbassato molto permettendo di raggiungere uno STI per lo meno discreto. Le condizioni non si sono rivelate mai ottimali ma perché il rumore prodotto dai bambini è sempre elevato.

Determinata la densità di occupazione ottimale, la tesi procede con altre due simulazioni: una con 10 bambini presenti e 6 sorgenti attive ma questa volta con sforzo vocale normale, la seconda per determinare l'intelligibilità del parlato con un livello di rumore di fondo minore.

Modello con 10 bambini presenti e 6 sorgenti attive con sforzo vocale normale				
Sorgenti /ricevitori	x	y	z	STI
Sorgente	9,8	12	1,25	/
R1	9,2	12,46	1,25	0,46
R2	10,3	12,46	1,25	0,47
R3	9,22	13,3	1,25	0,37
R4	9,8	13,7	1,25	0,33
R5	10,3	13,3	1,25	0,35

Tab. 8.5 - *Valori dello STI del modello con 6 sorgenti attive che parlano con sforzo vocale normale*

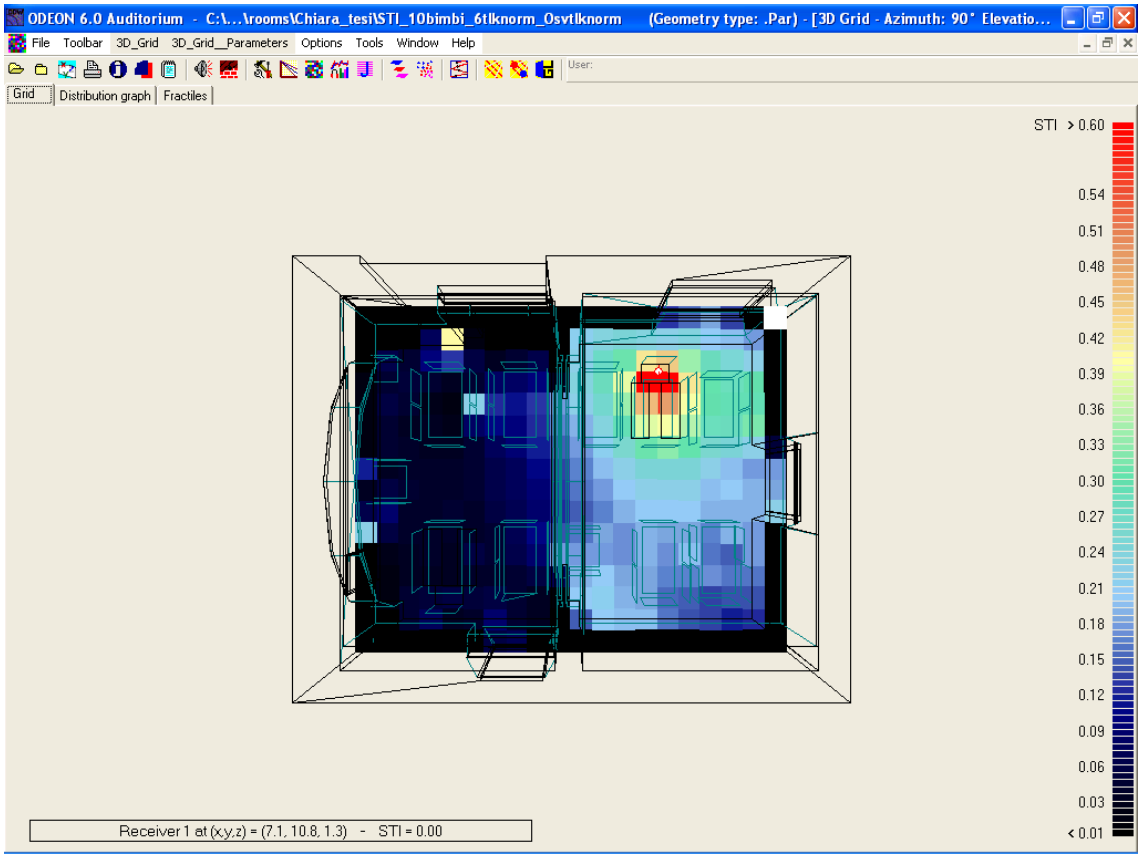


Fig. 8.4 - *Raffigurazione spaziale dell'indice STI nella situazione creata da 6 sorgenti che parlano con sforzo vocale normale*

La densità di occupazione diminuisce in modo drastico: nella tabella che segue sono inserite la densità ottimale trovata con le simulazioni, quella rilevata durante la campagna di misure e quella minima stabilita da normativa.

Densità di occupazione [m^2/persona]		
Normativa	Rilevata	Modello ottimale
0,7	1,6	6,6

Tab. 8.6 – *Confronto tra densità di occupazione*

8.2 Il progetto

La sala così come organizzata non rispecchiava le soluzioni distributive ottimali tipiche della sua destinazione d'uso. Il primo passo è stato quello di verificare e, in seguito modificare, il layout dei tavoli. Così come erano posizionati i tavoli, il passaggio del carrello delle pietanza era difficoltoso e i bambini si trovavano spesso l'uno attaccato all'altro; inoltre il numero dei tavoli era in eccesso rispetto all'effettiva necessità ed erano d'intralcio al movimento di inservienti, degli studenti e rendevano difficoltoso il raggiungimento delle vie di fuga.

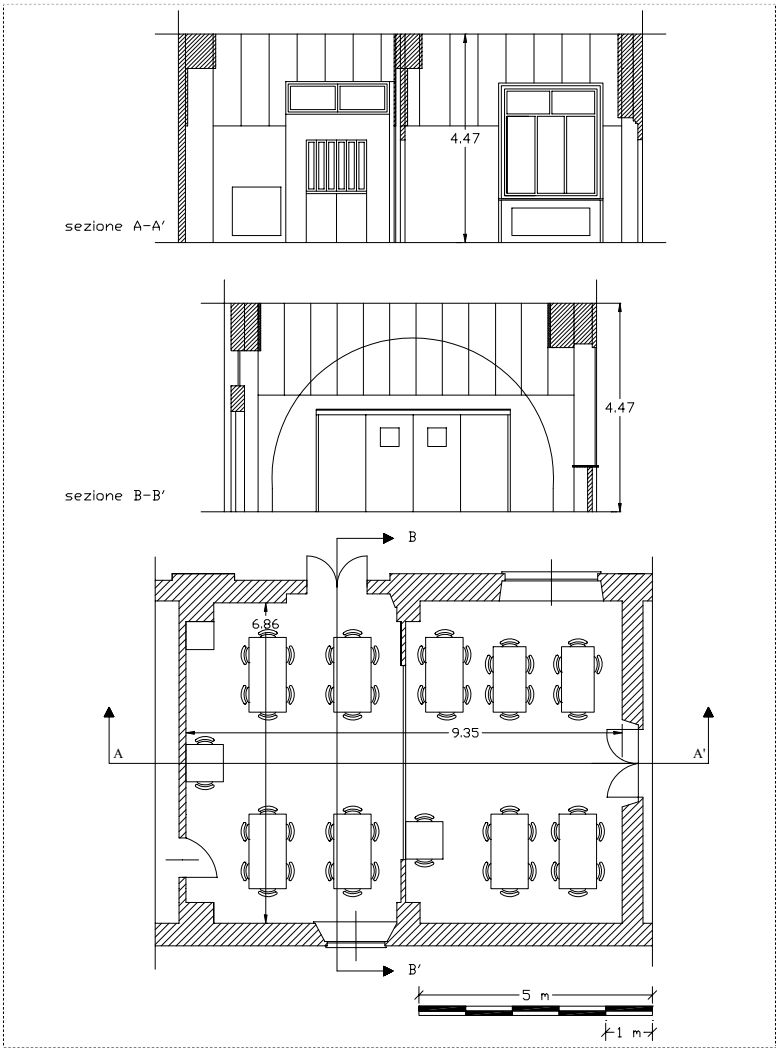


Fig. 8.4 - *Stato di fatto -pianta con distribuzione dei tavoli e sezioni*

Poiché il numero massimo di bambini non supera le 40 unità si possono eliminare i tavoli in eccesso, in modo da poterli sistemare mantenendo i distacchi minimi funzionali (come riportati nel primo capitolo). In più, in questo modo, è possibile prestare attenzione alla via di fuga, lasciando libero il passaggio in prossimità dell'uscita di sicurezza.

La mossa successiva è stata fatta in vista di migliorare l'intelligibilità al tavolo. Poiché dagli studi precedenti è emerso che il problema principale è rappresentato dall'elevato rumore di fondo creato dai bambini, l'idea è stata quella di modificare questa situazione utilizzando del materiale assorbente, efficace soprattutto alle medie e alte frequenze, come i pannelli di Celenit già impiegati in un intervento passato.

Coefficiente di assorbimento dei pannelli in Celenit						
Frequenze						
125	250	500	1000	2000	4000	8000
0,08	0,11	0,3	0,5	0,8	0,72	0,72

Tab. 8.6 - *Coefficiente di assorbimento dei pannelli di Celenit (www.celenit.it)*

Innanzi tutto è stato previsto il posizionamento questo materiale in modo tale da ricoprire l'intero soffitto: questo accorgimento consente di aumentare notevolmente l'assorbimento all'interno della mensa. I pannelli pensati hanno il vantaggio di essere anche molto colorati e di poterli accostare per realizzare alcuni disegni per rendere più allegro l'ambiente.

Fig. 8.5 - *Soluzioni realizzabili con i pannelli inCcelenit*

Poi, sempre in Celenit sono stati ideati dei séparé a forma di "T" da posizionare intorno ai tavoli ma pur sempre in modo tale da permettere dei corretti percorsi orizzontali. La soluzione a forma di "T" è stata presa in considerazione dopo alcune soluzioni. Fra le altre è risultata la più discreta e al tempo stesso quella che consente gli spostamenti più semplici.

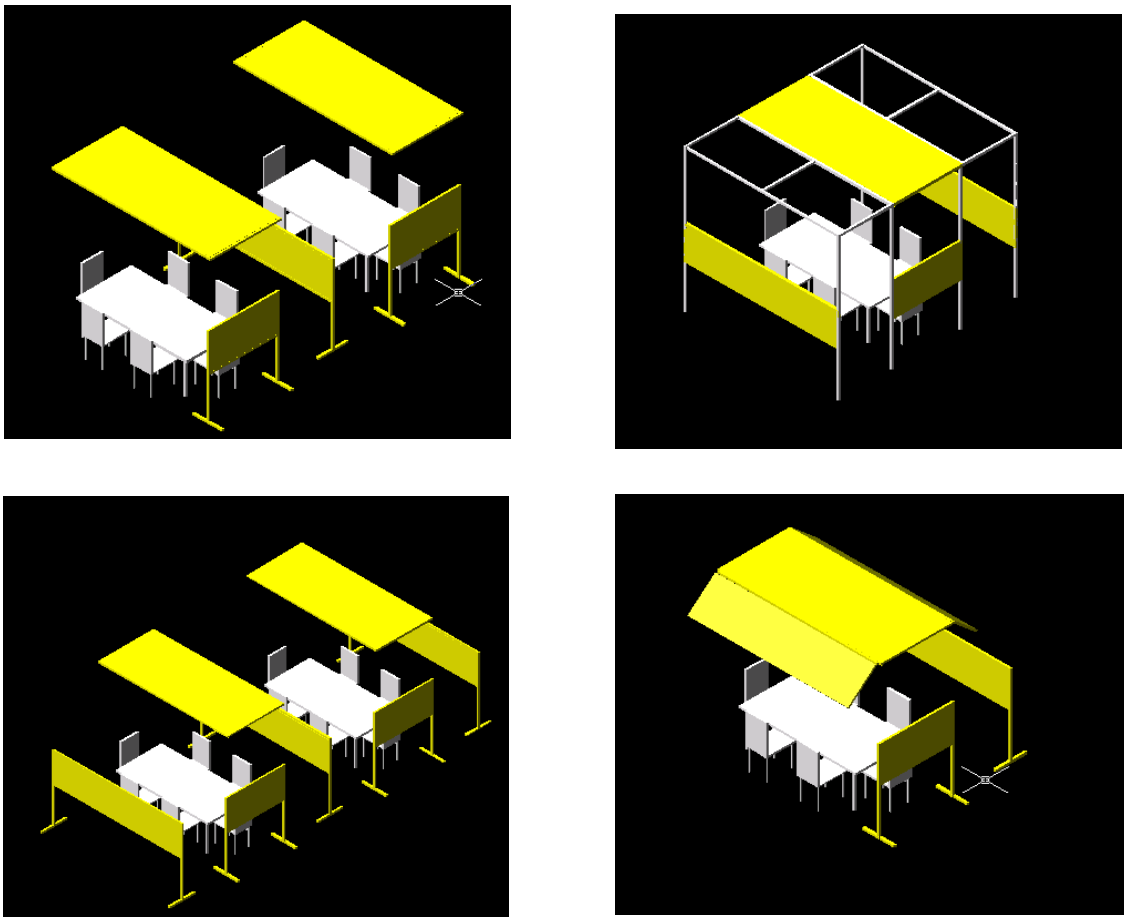


Fig. 8.6 – *Schemi prospettici di alcune soluzioni per la realizzazione dei séparé*

Le idee riportate in figura 8.6 sono state scartate per lo spazio richiesto, soprattutto quella con l'intelaiatura più estesa: queste soluzioni sono anche d'intralcio per il movimento dei bambini che potevano inciampare facilmente e rendere difficoltoso il raggiungimento delle vie di fuga.

Per rendere più agevole l'accesso alle sedie, nella soluzione finale sono stati eliminati i pannelli posizionati di fronte alla testata del tavolo ed è stato previsto un unico séparé tra le due postazioni e connesso ad un unico pannello posto sopra i due tavoli attigui, appunto a forma di "T". Con la soluzione scelta sono state rispettate le distanze minime funzionali che permettessero cioè ai bambini di muoversi liberamente e al tempo stesso

consentissero agli inservienti di lavorare ai tavoli ed effettuare la successiva fase di pulizia comodamente.

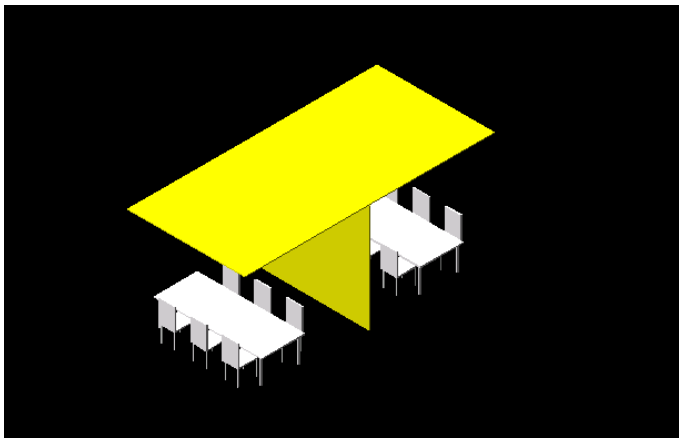


Fig. 8.7 - *Schema prospettico dei séparé a T*

8.2.1 Le simulazioni

Il primo modello realizzato da importare in Odeon è stato quello di taratura del progetto. Poiché rispetto allo schema iniziale è cambiato il layout dei tavoli, era necessario verificare la nuova soluzione e utilizzare poi i risultati come confronto con le successive simulazioni.

La taratura prevede una simulazione con 40 bambini presenti e 24 sorgenti attive con sforzo vocale elevato, esattamente come per la taratura realizzata per i diversi modelli di studio. I risultati non sono di molto differenti dal modello tarato nella prima fase dello studio.

Livello di pressione sonora – 40 bambini presenti e 24 sorgenti attive [dB]							
Frequenze							globale
125	250	500	1000	2000	4000	8000	
70,0	73,0	75,7	70,2	61,2	54,7	54,0	79,0

Tab. 8.7 - *Livello di pressione sonora del modello tarato*

Modello con 40 bambini presenti e 24 sorgenti attive con sforzo vocale elevato				
Sorgenti /ricevitori	x	y	z	STI
Sorgente	7,80	12,70	1,25	/
R1	7,80	12,00	1,25	0,2
R2	7,80	13,5	1,25	0,22
R3	8,80	12,00	1,25	0,22
R4	8,80	12,70	1,25	0,26
R5	8,80	13,5	1,25	0,19

Tab.8.8 - *STI calcolato per il modello tarato*

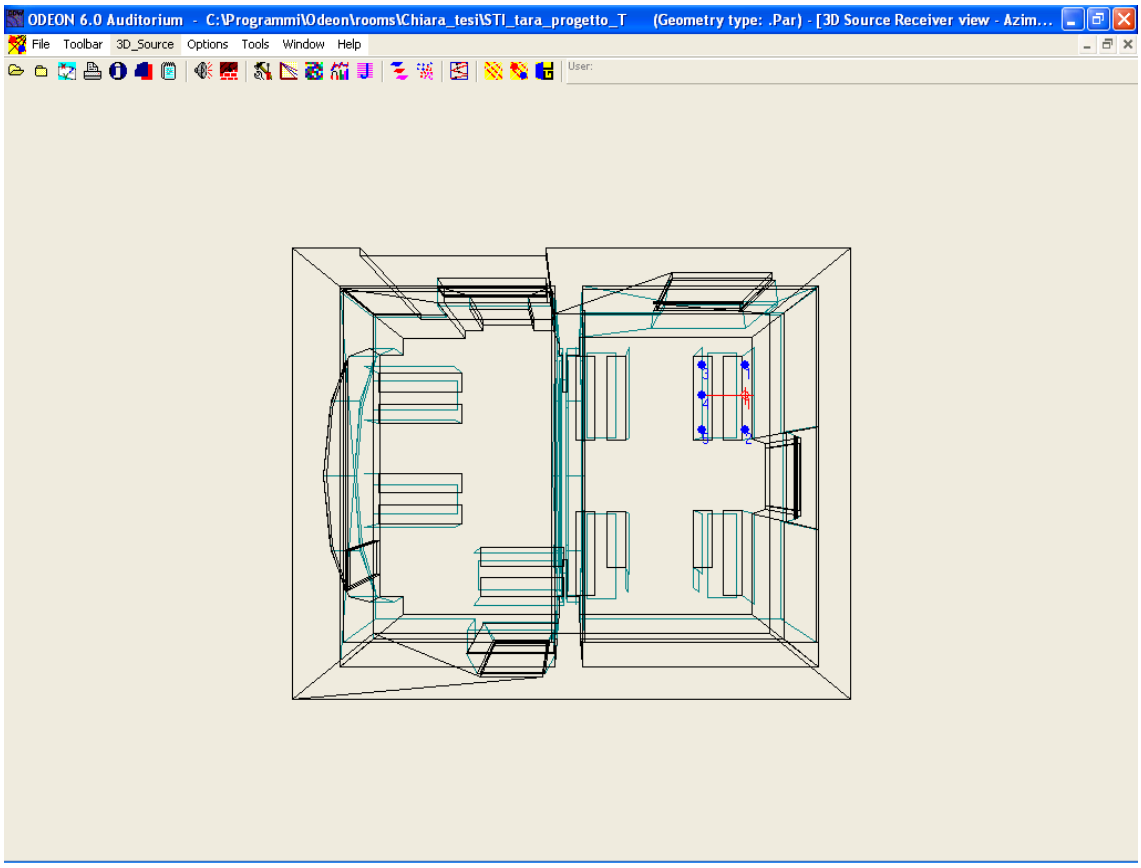


Fig. 8.8 - *Posizione della sorgente e dei ricevitori nel calcolo dello STI*

Il lavoro prosegue con la verifica del progetto: sul modello tarato vengono inserite le soluzioni di progetto (i séparé e il soffitto in Celenit). Una prima ipotesi è fatta con i

séparé in Celenit, mentre una seconda invece prevede, per valutare accuratamente la scelta dei materiali, dei pannelli non più assorbenti ma riflettenti.

Le tabelle ora inserite sono i risultati delle simulazioni del progetto nelle due soluzioni.

Lp Progetto con pannelli assorbenti – 40 bambini presenti e 24 sorgenti attive [dB]							
Frequenze							globale
125	250	500	1000	2000	4000	8000	
68,8	72,1	74,6	68,7	59,2	53,0	52,6	77,8
Lp Progetto con pannelli riflettenti – 40 bambini presenti e 24 sorgenti attive [dB]							
Frequenze							globale
125	250	500	1000	2000	4000	8000	
69,9	73,0	76,7	72,0	63,3	56,7	56,0	79,8

Tab. 8.9 - *Livello di pressione sonora del progetto con pannelli assorbenti e riflettenti*

Modello con 40 bambini presenti e 24 sorgenti attive con sforzo vocale elevato				
Sorgenti /ricevitori	x	y	z	STI
Sorgente	7,80	12,70	1,25	/
R1	7,80	12,00	1,25	0,33
R2	7,80	13,5	1,25	0,29
R3	8,80	12,00	1,25	0,30
R4	8,80	12,70	1,25	0,34
R5	8,80	13,5	1,25	0,27

Tab. 8.10 - *STI del progetto con pannelli assorbenti*

Il materiale assorbente riduce il livello di pressione sonora di 2,2 dB rispetto al modello iniziale, ma non basta a creare una situazione di buona intelligibilità al tavolo: infatti lo STI ad un metro dalla sorgente sonora è di 0,34 e non ancora sufficiente rispetto allo 0,4 come limite di discreta intelligibilità.

Poiché la soluzione con pannelli riflettenti non riduce il livello di pressione sonora prodotto dai bambini, le successive verifiche sono state fatte solo con i pannelli in celenit.

Dato che inserendo molto materiale assorbente non si ottiengono comunque dei risultati ottimali di intelligibilità, le simulazioni continuano prevedendo una riduzione del

numero dei bambini. Si prova a ricollegare, come già nella prima parte, il concetto di intelligibilità alla densità ottimale (per lo stato di fatto era 6,6 m^2/persona).
Le simulazioni procedono come nel paragrafo precedente ma questa volta non è stato necessario togliere molti bambini. A differenza di prima si raggiunge una discreta intelligibilità al tavolo con 20 bambini presenti di cui 12 parlano con sforzo vocale forte.

Lp – 20 bambini presenti e 12 sorgenti attive [dB]							
Frequenze							globale
125	250	500	1000	2000	4000	8000	
66,4	69,7	72,3	66,6	56,8	50,6	50,2	75,5

Tab. 8.11 - *Livello di pressione sonora del modello tarato*

Modello con 20 bambini presenti e 12 sorgenti attive con sforzo vocale elevato				
Sorgenti /ricevitori	x	y	z	STI
Sorgente	7,80	12,70	1,25	/
R1	7,80	12,00	1,25	0,4
R2	7,80	13,5	1,25	0,37
R3	8,80	12,00	1,25	0,38
R4	8,80	12,70	1,25	0,42
R5	8,80	13,5	1,25	0,35

Tab. 8.12 - *STI del progetto con pannelli assorbenti*

Dalla figura 8.8 si può anche vedere come questi séparé non solo portano un miglioramento all'intelligibilità della parola al tavolo, ma ne preservano la privacy. Nella soluzione proposta in questa simulazione, nei tavoli vicini lo STI non supera 0.1 sinonimo di intelligibilità inesistente e cioè che il discorso ad un tavolo non può essere percepito dai vicini.
La densità di occupazione è invece pari a 3,3 m^2/persona che è quasi 5 volte tanto rispetto agli standard abitativi suggeriti dalla normativa. In tabella 8.14 sono messi in relazione tutti i dati trovati nel corso del lavoro.

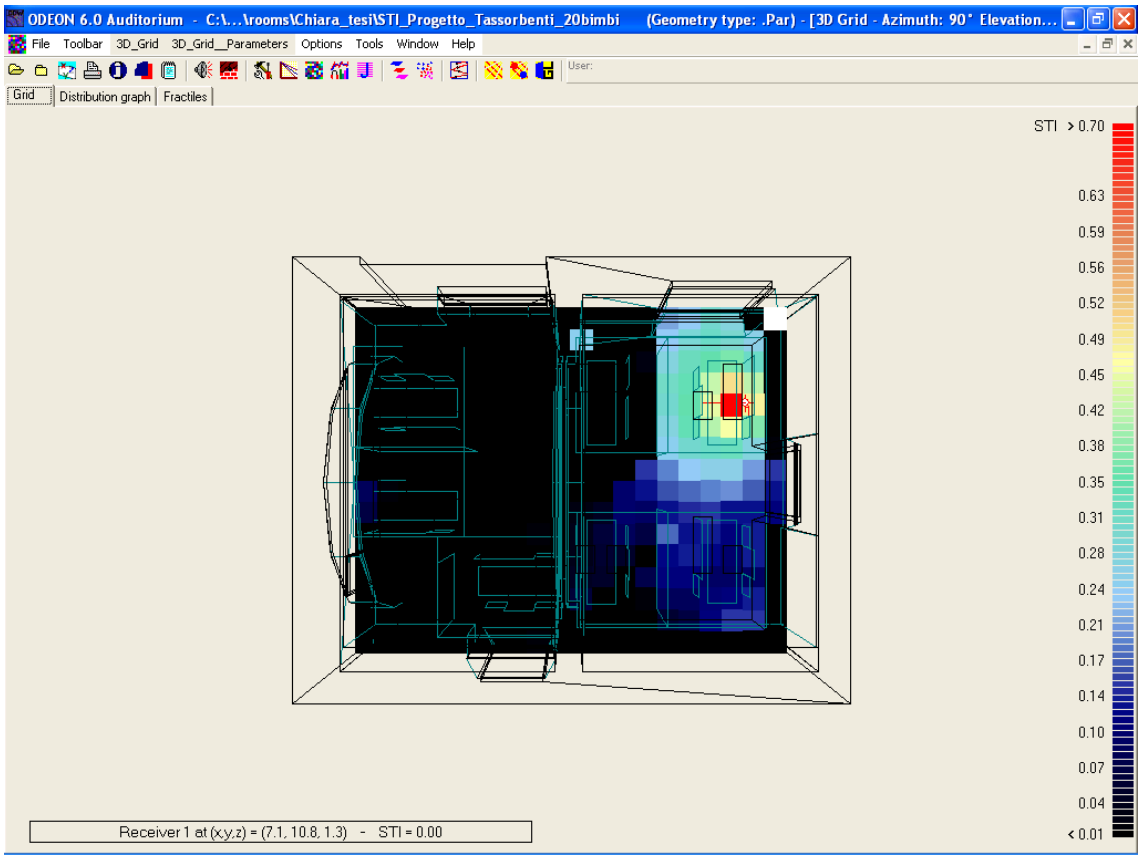


Fig. 8.9 - *Raffigurazione spaziale dell'indice STI nella situazione creata da12 sorgenti che parlano con sforzo vocale elevato*

Densità di occupazione [m^2/persona]			
Normativa	Rilevata	Modello ottimale	Progetto
0,7	1,6	6,6	3,3

Tab. 8.14 - *Confronto dei valori di densità di occupazione della sala*

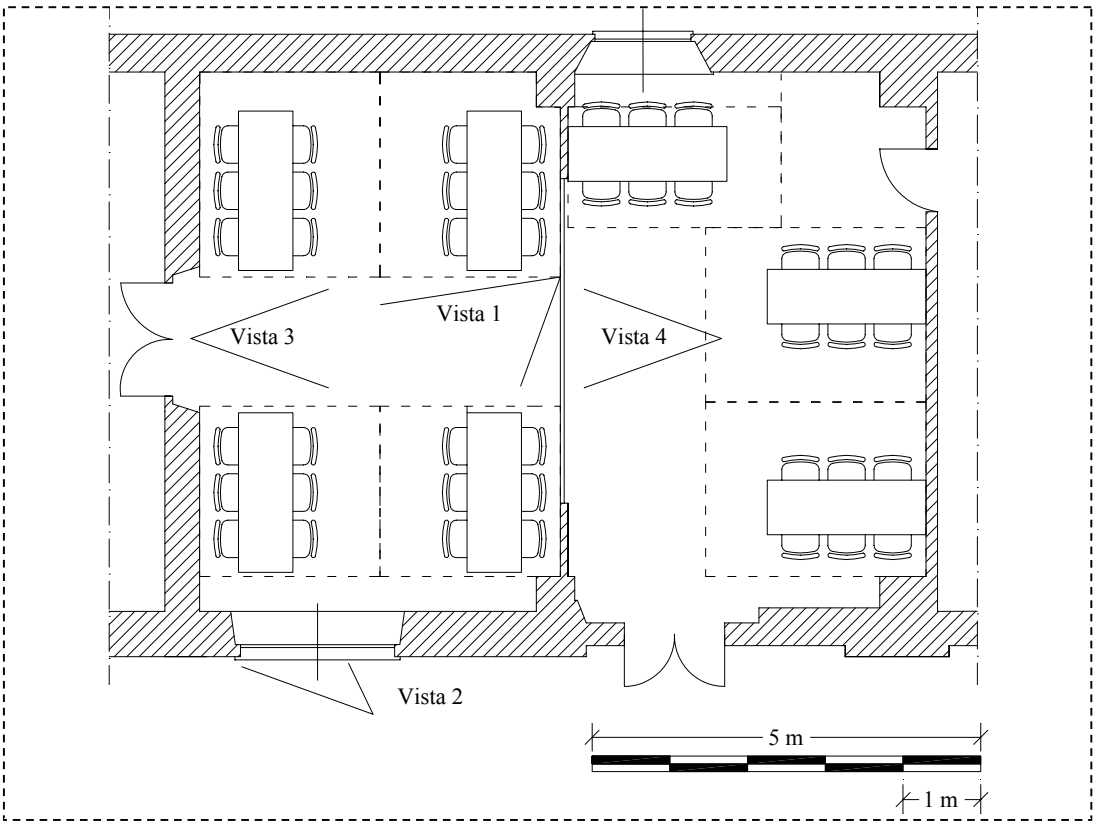


Fig. 8.10 - *Pianta con segnalazione delle viste*

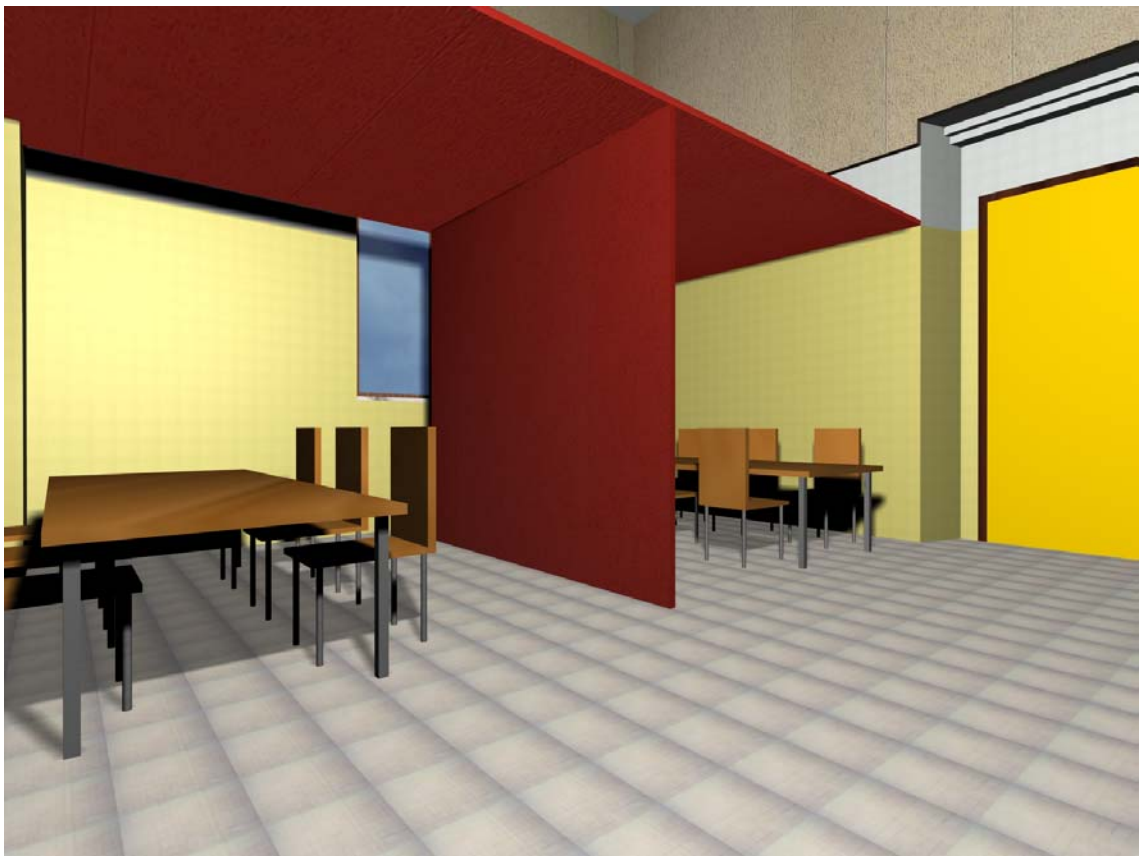


Fig. 8.11 -*Vista proposta dal punto 1*

Fig. 8.12 - *Vista proposta dal punto 2*

Fig. 8.13 - *Vista proposta dal punto 3*

Fig. 8.14 - *Vista proposta dal punto 4*

8.3 Conclusioni

Le diverse soluzioni delle simulazioni suggeriscono alcune soluzioni progettuali comuni.

La prima soluzione si ottiene lavorano sulla densità di occupazione. Diminuendo il numero di bambini, inevitabilmente si abbassa il livello di pressione sonora emesso con ovvi vantaggi sull'intelligibilità della parola. Nel caso studio si è infatti visto come con una densità di occupazione di 6,6 m^2/persona, pari a 10 bambini, si raggiungono valori di STI accettabili.

La seconda soluzione richiede di abbassare il livello di pressione sonora all'interno della sala: dato che non è possibile realizzare una mensa per così pochi studenti, soprattutto perché risulterebbe antieconomico su tutti i fronti, per abbassare il rumore di fondo risulta necessario inserire del materiale assorbente.

Poiché il tono di voce dei bambini (che segue il Cocktail Party Phenomenon) non è un fenomeno controllabile e di conseguenza il livello del rumore di fondo sarà

inevitabilmente sempre molto alto, anche inserendo materiale assorbente risulta necessario agire nuovamente sulla densità di occupazione.

Così facendo con l'ultima simulazione si dimostra come con l'uso di séparé in Celenit sia possibile ridurre il numero di bambini da 40 a 20, il doppio rispetto alle prove realizzate nel modello di simulazione dello stato di fatto.

Anche negli altri casi, che poi non sono stati approfonditi, l'uso di queste soluzioni progettuali avrebbe migliorato la qualità acustica. Innanzitutto perché la densità di occupazione è nuovamente piuttosto alta e, in secondo luogo, gli ambienti sono fortemente riverberanti e le sale non sono mai state trattate acusticamente.

Il progetto di séparé in materiale assorbente andrebbero molto bene per entrambe le soluzioni purché il numero dei bambini sia proporzionalmente ridotto. Nella mensa della scuola Pianea , dove già la densità di occupazione è piuttosto bassa, l'uso di questi pannelli sarebbe anche facilmente applicabile rispettando, senza troppi problemi, gli standard minimi funzionali. Invece, nel caso di mense molto grosse come quella della scuola di Torino e soprattutto organizzate per molti studenti, è possibile prevedere diversi turni per i pasti in modo tale da ridurre il numero dei tavoli e poter inserire i séparé rispettando le norme distributive.

Va poi ricordato che l'uso dei software di simulazione è stato fondamentale per lo svolgimento di questa tesi: le possibilità offerte da questi programmi sono indispensabili per chi vuole affrontare un progetto o uno studio dell'ambiente acustico di una sala. Infatti permettono di predire il fenomeno acustico in modo più approfondito rispetto ai modelli statistici per l'elevata quantità di informazioni che forniscono all'utente.

8.4 Bibliografia

Libri

1. Odeon Room Acoustics Program Version 6.0, Industrial, Auditorium and Combined editinon, *User Manual,* 2002

Tesi di laurea

2. S. LEVORIN, *Studio acustico di auditorium scolastici*, Politecnico di Torino, I Facoltà di Architettura, relatore: prof. Marco Filippi, arch. Arianna Astolfi, A.A 2002-2003
3. A. RICCARDI, *Applicazione di software di simulazione numerica in acustica architettonica. La sala conferenze del Museo Regionale di Scienze naturali in Torino*, Politecnico di Torino, Facoltà di architettura, relatore: prof. Marco Filippi, arch. Arianna Astolfi, A.A. 2001/2002

Siti internet

4. www.celenit.it
5. www.isover.it

CONCLUSIONI

Questa tesi di laurea si è proposta di determinare, valutare e poi ottimizzare la qualità del comfort acustico all'interno di tre mense scolastiche.

L'avere condizioni ottimali di ascolto all'interno delle strutture scolastiche assume oggi una grande importanza dal punto di vista della salute. Infatti è dimostrato che, per i bambini che passano gran parte della giornata a scuola, la qualità dell'ambiente in cui trascorrono il tempo influisce pesantemente sul rendimento scolastico, sulla concentrazione e sulla stanchezza psicofisica che si accumula durante le ore di attività.

Un fenomeno da controllare per ottenere un ambiente sonoro ottimale è l'intelligibilità della parola che, dove non è sufficiente può avere ripercussioni sui giovani studenti durante la prima fase di apprendimento.

I dati reperiti in seguito alla campagna di misure sono stati elaborati in modo da definire acusticamente tutti gli ambienti oggetto di studio ed è così stato possibile fare delle considerazioni sulla loro bontà acustica. Ma lo sforzo maggiore è stato quello di determinare l'indice STI, Speech Intelligibility Index, come parametro caratterizzante l'intelligibilità del parlato per ogni caso oggetto di studio.

I risultai hanno permesso di stabilire come in queste mense l'intelligibilità sia fortemente influenzata non solo dal tempo di riverberazione ma soprattutto dal livello di pressione sonora presente all'interno delle sale che, data la tipologia di utenti, raggiunge sempre valori molto alti.

Le simulazioni svolte con un software specifico, realizzate per un solo caso studio a causa dei lunghi tempi di elaborazione hanno permesso di ideare alcune soluzioni progettuali che vanno ad agire su due fronti: innanzitutto diminuire la densità di occupazione, che non sarà mai ottimale per i limiti imposti dalla gestione scolastica, e allo stesso tempo intervenire sul livello di pressione sonora con l'uso di materiale assorbente.

L'uso dei software di simulazione si è verificato fondamentale per lo svolgimento di questa tesi: le possibilità offerte da questi programmi sono indispensabili per chi vuole affrontare un progetto o uno studio dell'ambiente acustico di una sala. Infatti permettono di predire il fenomeno acustico in modo più approfondito rispetto ai modelli statistici per l'elevata quantità di informazioni che forniscono all'utente.

APPENDICE 1

FONDAMENTI DI ACUSTICA

1.1 La descrizione del suono

Il suono è una perturbazione a carattere oscillatorio che si propaga in un mezzo elastico, di frequenza tale da essere percepita dall'orecchio umano (da 16 a 20.000 Hz).

Il meccanismo di propagazione di un'onda sonora può essere descritto con maggiore precisione se si suppone che il mezzo elastico sia costituito, in assenza di forze agenti su di esso, da particelle fisse nello spazio. Il fenomeno ondulatorio, generato dalla vibrazione di corpo che, spostandosi dalla sua posizione di equilibrio, comprime e deprime il mezzo elastico in cui è immerso, fa sì che le particelle del mezzo in cui si trasmette vibrino propagando la perturbazione alle particelle vicine; il fenomeno si propaga per tutto il volume e determina un trasferimento di energia. Tali vibrazioni locali (di compressione e rarefazione) nei fluidi sono sempre parallele alla direzione di propagazione dell'onda e si parlerà di onde longitudinali, mentre nel caso di solidi sono presenti anche onde trasversali.

La velocità con cui le particelle si muovono va distinta dalla velocità con cui si propaga l'onda sonora: la *velocità di propagazione del suono* dipende unicamente dalle proprietà fisiche del mezzo; per l'aria, nell'ipotesi di gas perfetto, la velocità del suono in funzione della temperatura è:

$$c = 331.6 + 0.6 \cdot T \qquad [\text{m/s}]$$

Per esempio, per ottenere la velocità del suono in aria a 20 ° C, basta introdurre il valore della temperatura in gradi centigradi nella formula:

$$c = 331.6 + 0.6 \cdot 20 \cong 344 \qquad [\text{m/s}]$$

Nel fenomeno sonoro oltre alla velocità di propagazione occorre considerare anche alcune proprietà fisiche caratteristiche delle onde, quali la frequenza, il periodo e la lunghezza d'onda.

La *frequenza* è la misura fisica del numero di oscillazioni complete effettuate dalla sorgente sonora nell'unità di tempo:

$$f = \frac{1}{T} \qquad [\text{Hz}]$$

Il *periodo* è l'inverso della frequenza ed è definito come il tempo necessario a compiere una oscillazione completa (una di compressione più una di depressione):

$$T = \frac{1}{f} \qquad [\text{s}]$$

La lunghezza d'onda è la distanza percorsa dall'onda sonora in un periodo, cioè durante unn'oscillazione completa; si indica con la lettera λ e si misura in metri [m]. La lunghezza d'onda è legata alle altre proprietà delle onde dalla relazione:

$$\lambda = \frac{c}{f} = cT \qquad [\text{m}]$$

Tenendo presente la propagazione del suono nell'aria, in condizioni normali, nel campo dell'udibile la lunghezza d'onda varia all'incirca tra λ = 17 m per f = 20 Hz e λ= 22 mm per f = 16 kHz.

1.2 Grandezze fondamentali e le loro unità di misura

Le onde sonore vengono molto spesso descritte in termini di pressione sonora. La *pressione acustica p* in un mezzo è la differenza tra la pressione P in un dato istante t in presenza di un fenomeno sonoro e la pressione P_o che si avrebbe nello stesso punto in assenza di suono:

$$p(x,y,z,t) = P(x,y,z,t) - P_0 \qquad [\text{Pa}]$$

P_0 è la pressione statica del mezzo che per la propagazione in aria corrisponde alla pressione atmosferica ($\cong 10^5$ [Pa])

La pressione sonora è una variabile nello spazio e nel tempo. È utile allora considerare la pressione acustica come valore efficace della,perturbazione di pressione:

$$p_{eff}(x,y,z) = \sqrt{\frac{1}{t}\left(\int_o^t p^2(x,y,z,\tau)d\tau\right)} \qquad [\text{Pa}]$$

La potenza sonora W viene definita come l'energia irradiata nell'unità di tempo da una sorgente. L'unità di misura è il Watt [W]. La potenza sonora emessa da una sorgente si irradia in tutte le direzioni dando origine in ogni punto dello spazio circostante una intensità sonora.

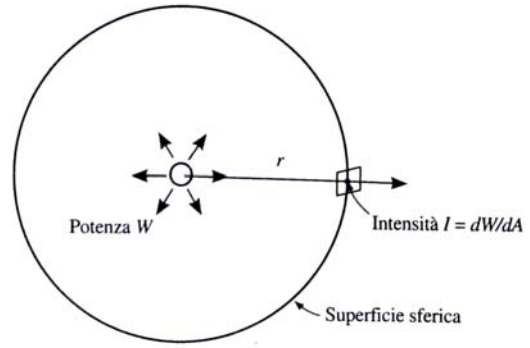


Fig.1.1 - Potenza (W) e intensità acustica (I)

L'intensità acustica I di un'onda sonora è definita come la potenza che attraversa una superficie unitaria disposta ortogonalmente alla direzione di propagazione; essa rappresenta perciò l'energia che fluisce attraverso l'unità di superficie nell'unità di tempo:

$$I = \frac{dW}{dA} \qquad [\text{W/m}^2]$$

La *densità di energia acustica D* rappresenta l'energia sonora contenuta nell'unità di volume all'intorno di un punto considerato del mezzo di propagazione:

$$D = \frac{I}{c} = \frac{p^2}{\rho c^2} \qquad [\text{J/m}^3]$$

e si verifica che è data dal rapporto tra l'intensità acustica misurata nella direzione di propagazione dell'onda e la velocità del suono nell'aria.

Questo perché in campo libero, per un'onda piana o un fronte d'onda sferico, si dimostra che l'intensità sonora è proporzionale al quadrato della pressione sonora:

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \qquad [\mathrm{w/m^2}]$$

1.3 I livelli sonori

L'orecchio umano è in grado di percepire una pressione minima di $2 \cdot 10^5$ [Pa] e all'estremo opposto una pressione di 20 [Pa] porta ad una sensazione di dolore. Allo stesso modo, l'intensità di minima udibilità è di 10^{-12} W/m^2 e la soglia del dolore si attesta intorno a 1 W/m^2. Da questo si intuisce velocemente come il campo di valori entro il quale può variare al pressione sonora risulta esteso su oltre sei ordini di grandezza mentre quello dell'intensità varia ancora su un range molto più esteso. La difficoltà a trattare con numeri dispersi in un campo eccessivamente esteso e il fatto che l'orecchio umano risponde con una sensazione che cresce non linearmente ma logaritmicamente con lo stimolo, hanno portato alla necessità di esprimere le variazioni di queste grandezze su scala logaritmica.

Si è operata una trasformazione nelle unità di misura passando a considerare non tanto il valore della grandezza ma il suo livello rispetto a un valore di riferimento. Si è così assunto come livello di una grandezza acustica quel valore che si ottiene moltiplicando per dieci il logaritmo in base dieci del rapporto tra il valore della grandezza presa in considerazione e un valore di riferimento. Il risultato viene espresso in *decibel* [dB] ed è una quantità dimensionale.

Nel caso dell'intensità acustica, il livello d'intensità è dato da:

$$L_I = 10 \log_{10} \frac{I}{I_o} \qquad [\mathrm{dB}]$$

dove il valore dell'intensità sonora di riferimento è uguale a 10^{-12} W/m^2. Il valore dell'Intensità acustica I si ricava dalla relazione inversa:

$$I = I_0 \cdot 10^{L_I/10} \qquad [\mathrm{W/m^2}]$$

Analogamente la potenza sonora W può essere espressa come livello in decibel:

$$L_w = 10\log_{10}\frac{W}{W_o} \qquad [\text{dB}]$$

dove W_o vale 10^{-12} W

Potenza Sonora [W]	*Livello di potenza sonora [dB]*	*Sorgente*
10^4	160	Turboreattore
10^1	130	Piena orchestra
1	120	Martello perforatore
10^{-1}	110	Radio ad alto volume
10^{-2}	100	Strumenti a percussione
10^{-3}	90	Grido
10^{-6}	60	Conversazione normale
10^{-9}	30	Bisbiglio

Tab. 1.1 - *Potenza sonora e corrispondenti livelli di potenza sonora di alcune tipiche sorgenti*

Il livello di pressione sonora invece è:

$$L_p = 10\log_{10}\frac{p^2}{p_0^2} = 20\log\frac{p}{p_0} \qquad [\text{dB}]$$

dove il valore di p_0 è convenzionalmente assunto pari a $2\cdot10^{-5}$ [Pa], che corrisponde proprio alla soglia uditiva umana media a 1000 Hz. I valori della pressione vanno intesi come valori efficaci.

Il livello di densità sonora:

$$L_D = 10\log_{10}\frac{D}{D_o} \qquad [\text{dB}]$$

dove D_o vale $2.94\cdot10^{-15}$ J/m^3.

I valori di riferimento sono stati scelti in modo che in condizioni ambientali normali, cioè a pressione atmosferica e temperatura ambiente, si abbia in campo libero:

$$I_0 \cong \frac{p^2}{\rho c} \qquad [\text{W/m}^2]$$

$$L_I = 10\log_{10}\frac{I}{I_o} \cong 10\log\frac{p^2}{\rho c}\cdot\frac{\rho c}{p_0^2} \cong 10\log\frac{p^2}{p_0^2} \qquad \text{[dB]}$$

$$L_I \cong L_p$$

Il livello totale non può essere ottenuto sommando i due livelli parziali che caratterizzano ciascuna delle due sorgenti, occorre infatti risalire alle potenze sonore corrispondenti poiché le grandezze sommabili sono solo quelle energetiche. Il livello totale viene così calcolato:

$$L_{tot} = 10\log\left(\sum_{i=1}^{N} 10^{L_i/10}\right) \qquad \text{[dB]}$$

1.4 Lo spettro sonoro

Quando un segnale acustico varia nel tempo secondo una funziona sinusoidale, prende il nome di *suono puro.* Le sorgenti sonore reali però difficilmente emettono suoni puri vibrando con oscillazione sinusoidale di ben definita frequenza, il più delle volte il suono può essere considerato come composto da un insieme di suoni puri di diverse frequenze, variabili discretamente o con continuità (si parla di *segnale complesso* e/o rumore).

Con il *teorema di Fourier* è possibile sviluppare una funzione $x = x(t)$ periodica di periodo T e di frequenza $1/T$, in una somma di infiniti termini armonicamente correlati ciascuno dei quali caratterizzato da una frequenza multipla di fondamentale f. In generale con il teorema di Fourier il suono periodico può sempre essere scomposto in un insieme di suoni puri di diversa frequenza (armoniche).

Determinare la frequenza e l'ampiezza delle singole armoniche presenti nel suono complesso costituisce *l'analisi di Fourier*. La rappresentazione di tale analisi sotto forma di grafico livello sonoro – frequenza costituisce lo *spettro sonoro*.

Nel caso di un suono puro lo spettro è costituito da una sola linea in corrispondenza della frequenza del suono stesso. Invece nel caso di un suono complesso lo spettro è caratterizzato da più linee in corrispondenza delle frequenze multiple che compongono il suono originario. Un suono aperiodico, cioè un rumore, a differenza degli altri, è caratterizzato da uno spettro continuo.

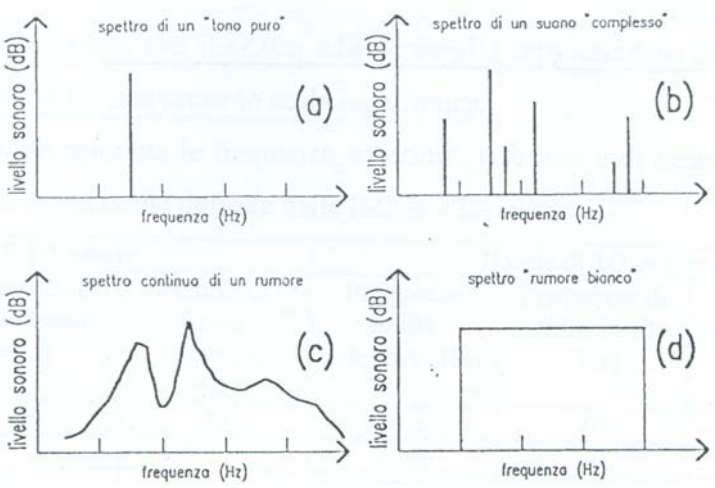


Fig. 1.2 - *Esempi di spettri sonori*

L'analisi della composizione in frequenza può essere condotta valutando il contenuto di energia sonora all'interno di prefissati intervalli di frequenze, le *bande*. Ciascuna banda è caratterizzata dalla frequenza di taglio superiore t_s, da quella di taglio inferiore t_i e dalla frequenza di centro banda f_c.

Nell'analisi spettrale le bande di frequenza vengono fissate in modo da avere larghezza costante o proporzionale alla frequenza inferiore della banda: nel primo caso si ottiene una *analisi a bande di ampiezza costante* o a *banda stretta*, descrizione in genere riservata ad analisi approfondite della composizione in frequenza; nel secondo caso si ha una *analisi in bande di ampiezza percentuale costante* da 1/1 ottava o 1/3 di ottava.

In quest'ultimo caso, che è il più frequente in acustica, le ampiezze di banda e le frequenze inferiori e superiori delle bande sono in progressione geometrica.

La frequenza nominale di centro banda si ottiene :

$$f_c = \sqrt{f_s \cdot f_i}$$

Le bande di frequenza utilizzate in acustica hanno la ragione della progressione geometrica pari a una potenza di 2:

$$f_s = 2^n f_i$$

Per $n=1$ si ottengono le bande di ottava:

$$f_s = 2 f_i \qquad f_i = \frac{f_c}{\sqrt{2}} \qquad f_s = \sqrt{2} f_c$$

Per *n=1/3* si ottengono le bande di terzi di ottava:

$$f_s = \sqrt[3]{2} f_i \qquad f_i = \frac{f_c}{\sqrt[6]{2}} \qquad f_s = \sqrt[6]{2} f_c$$

Il campo udibile può essere rappresentato mediante bande d'ottava o di terzi di ottava contigue fissate con convenzione internazionale. È comunque interessante notare come l'udito sia meglio rappresentato dall'analisi di 1/3 di ottava con asse delle frequenze in scala logaritmica.

Frequenza			*Frequenza*		
Centrale	*Inferiore*	*Superiore*	*Centrale*	*Inferiore*	*Superiore*
16	11	22	1000	710	1420
31,5	22	44	2000	1420	2840
63	44	88	4000	2840	5680
125	88	117	8000	5680	11360
250	177	355	16000	11360	22720
500	355	710			

Tab. 1.2 - *Suddivisione dello spettro di frequenze udibili in bande di ottava*

Frequenza			*Frequenza*			*Frequenza*		
Centrale	*Inferiore*	*Superiore*	*Centrale*	*Inferiore*	*Superiore*	*Centrale*	*Inferiore*	*Superiore*
16	14,1	17,8	200	178	224	2500	2239	2818
20	17,8	28,2	250	224	282	3150	2818	3548
25	22,4	28,2	315	282	355	4000	3548	4467
31,5	28,2	35,5	400	355	447	5000	4467	5623
40	35,5	44,7	500	447	562	6300	5623	7079
50	44,7	56,2	630	562	708	8000	7079	8913
63	56,2	70,8	800	708	891	10000	8913	11220
80	70,8	89,1	1000	891	1122	12500	11220	14130
100	89,1	112	1250	1122	1413	16000	14130	17780
125	112	141	1600	1413	1778	20000	17780	22390
160	141	178	2000	1778	2239			

Tab. 1.3 - *Suddivisione dello spettro di frequenze udibili in bande di terzo di ottava*

1.5 Sensazione sonora e livello di sensazione

Il sistema uditivo umano non è in grado di percepire tutti i fenomeni sonori ambientali, ma solo quelli compresi in un dato campo di frequenze. I suoni di frequenza inferiore a 16 Hz non sono udibili e prendono il nome di *infrasuoni*, così come non sono udibili i suoni di frequenza superiore ai 16 kHz che sono detti *ultrasuoni*.

Per studiare l'intensità soggettiva in suoni di frequenza diversa, si utilizza un sistema per confronto con la sensazione prodotta da un suono di riferimento. Il suono di riferimento utilizzato è un tono puro di 1 kHz; il livello di pressione sonora del suono di

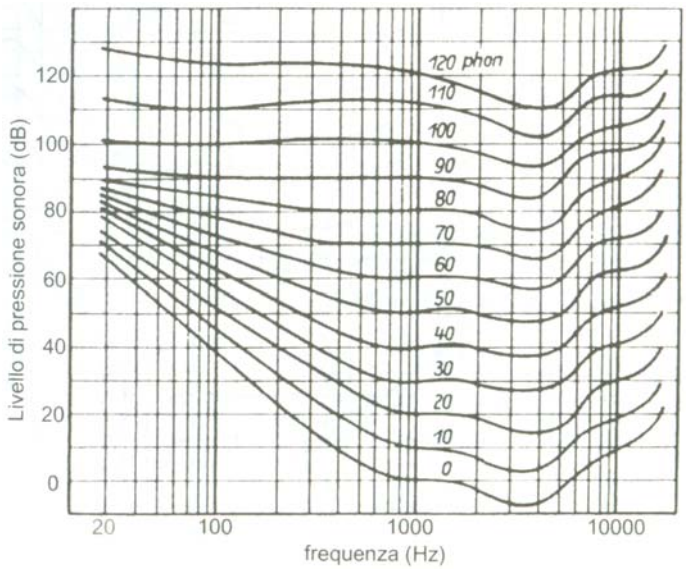


Fig. 1.3 - *Curve isofoniche di Fletcher e Munson*

riferimento, per cui la sensazione sonora è uguale a quella del suono puro oggetto di esame, fu definito come livello di sensazione sonora (*loudness level*) espresso in *phon*. Questo vuol dire che un tono puro di 1kHz a pressione sonora di *n* dB induce un livello di sensazione sonora di *n* phon. Suoni a frequenza diversa che diano la stessa sensazione soggettiva di intensità sono detti isofoni o isofonici.

Fletcher e Munson ottennero la prima famiglia di curve isofoniche nel 1937, mentre le curve isofoniche adottate dalla normativa attuale (ISO 226) sono state determinate nel 1956 da Robinson e Dadson. I valori del livello di pressione sonora sono stati misurati in assenza dell'ascoltatore, le differenze rispetto alle curve di Fletcher e Munson, sono probabilmente legate a fenomeni di diffrazione dell'onda sonora intorno alla testa.

La curva isofonica a 4,2 phon, indicata con MAF (minimum Audible Field), rappresenta, per ogni frequenza, il minimo livello di pressione sonora per cui un suono è udibile, e corrisponde alla soglia uditiva.Le curve isofoniche descrivono la relazione fra

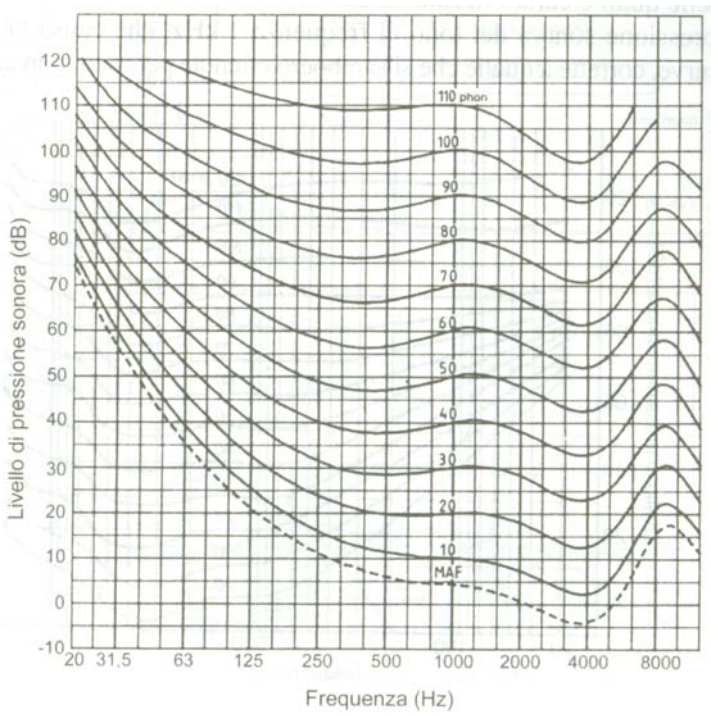


Fig. 1.4 - *Curve isofoniche riportate nella norma ISO 226*

suoni percepiti soggettivamente come ugualmente intensi e il rispettivo valore di intensità oggettiva, ma non consentono di trovare la relazione tra l'intensità oggettiva e intensità soggettiva. Viene a tal proposito utilizzata la sensazione sonora, un' altra grandezza soggettiva, la cui unità di misura è il *son*. Per convenzione 1 son corrisponde alla sensazione sonora indotta da un tono puro di 1kHz e di 40 dB.

1.6 Curve di ponderazione

Per la valutazione del rumore rispetto ai suoi effetti sull'uomo occorre stabilire una corrispondenza tra i dati oggettivi misurati e la sensazione sonora. Se ciò è immediato per i toni puri, per i quali possono essere facilmente utilizzate le curve isofoniche, non lo è invece per i suoni con spettro complesso, per i quali sono stati suggeriti procedimenti basati sull'analisi in frequenza, sull'associazione ad ogni banda di frequenza di un certo livello di sensazione e quindi sul calcolo di un livello di sensazione globale.

Dato che questi procedimenti hanno avuto una scarsa applicazione pratica, si è pensato con buona approssimazione di operare una ponderazione in frequenza corrispondente alla curva isofonica il cui livello è prossimo al livello di pressione sonora del rumore in esame. Sono nate così le curve di ponderazione A, B e C, corrispondenti rispettivamente

alle isofoniche a 40, 70 e 100 phon. A queste si è poi aggiunta la curva D, ricavata in base a misure sul disturbo prodotto da rumore di aerei.

La scala di pesatura più usata è la scala A, che raggruppa valori di correlazione determinati in modo tale da tener conto della sensibilità dell'orecchio umano alle varie frequenze. Il risultato delle misure eseguite utilizzando questa curva di ponderazione è espresso in dB(A).

Frequenza	*Curva A*	*Frequenza*	*Curva A*
31.5	-39.4	1000	0.0
40	-34.6	1250	0.6
50	-30.2	1600	1
63	-26.2	2000	1.2
80	-22.5	2500	1.3
100	-19.1	3150	1.2
125	-16.1	4000	1
160	-13.4	5000	0.5
200	-10.9	6300	-0.1
250	-8.6	8000	-1.1
315	-6.6	10000	-2.5
400	-4.8	12500	-4.3
500	-3.2	16000	-6.6
630	-1.9	20000	-9.3
800	-0.8		

Tab. 1.4 - *Attenuazioni, in dB, alle diverse frequenze per la curva di ponderazione A*

1.7 La propagazione del suono in diverse condizioni di campo acustico

Il modo in cui il suono si propaga allontanandosi dalla sorgente che lo genera, è fortemente condizionato dalle caratteristiche dell'ambiente in cui si trova la sorgente.

1.7.1 La propagazione in campo libero

Il caso più semplice è quello in cui il suono si propaga liberamente in tutte le direzioni senza incontrare ostacoli. Per ogni punto del campo, l'effetto delle onde riflesse è trascurabile rispetto a quello delle onde dirette.

Supponendo che la sorgente sonora sia una sfera, l'intensità sonora è uniforme per tutti i punti aventi la stessa distanza dalla sorgente.

$$I = \frac{W}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \qquad [\mathrm{W/m^2}]$$

Si ottiene che per una data potenza della sorgente, l'intensità diminuisce con il quadrato della distanza dalla sorgente. Si dice che l'intensità diminuisce per divergenza geometrica, cioè solo per il fatto che ci si allontana dalla sorgente.
Scrivendo la relazione in termini logaritmici:

$$L_p = L_I + 10\log(\frac{I}{I_0})$$

$$L_p = 10\log(\frac{W \cdot Q_\Theta}{I_0 \cdot 4\pi d^2})$$

Ora moltiplico per $\frac{W_0}{W_0}$

$$L_p = 10\log\frac{W_0}{W_0} + 10\log\frac{W_0}{I_0}\frac{Q_\Theta}{4\pi d^2}$$

$$L_p = L_w - 20\log d - 11 + 10\log Q_\Theta \qquad [\mathrm{dB}]$$

Q_Θ è il fattore di direttività che si inserisce all'interno della formula dell'intensità ($I = Q_\Theta \frac{W}{4 \cdot \pi \cdot d^2}$) poiché le sorgenti reali anziché emettere secondo simmetrie generali semplici presentano caratteristiche di direzionalità lungo le direzioni privilegiate.

1.7.2 La propagazione negli ambienti chiusi

Quando un raggio colpisce una delle superfici che delimitano l'ambiente, parte dell'energia viene assorbita e parte viene riflessa. Tipicamente il coefficiente di assorbimento acustico dipende dall'angolo di incidenza e quasi sempre il coefficiente di assorbimento dell'ambiente varia da superficie a superficie; quindi oltre alla media su tutti gli angoli è opportuno effettuare anche la media dei valori che va ad assume sulle diverse superfici.
Se α_1, α_2, $\alpha_{3,\ \ldots}$ sono i coefficienti di assorbimento acustico rispettivamente delle superfici di area S_1, S_2, S_3…, il coefficiente di assorbimento acustico medio dell'ambiente complesso è:

$$\overline{\alpha} = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + ... + \alpha_n S_n}{St} = \frac{1}{S}\sum_i \alpha_i S_i$$

$$A = \overline{\alpha} \cdot S = \sum_i \alpha_i S_i \qquad [\mathrm{m}^2]$$

Con $S = S_1 + S_1 + S_3 + ... + S_n$ ed A rappresenta l'assorbimento totale presente nell'ambiente e viene propriamente definita "area di assorbimento acustico equivalente".

Per effetto delle riverberazione il campo acustico all'interno degli ambienti confinati dipende fortemente dal fenomeno della riflessione del suono sulle superfici, sugli oggetti e sulle persone presenti. Infatti quando una sorgente sonora è attiva all'interno di un ambiente chiuso, il livello di pressione sonora in un punto dell'ambiente sarà determinato non più solo dall'energia sonora irradiata direttamente, ma anche dal

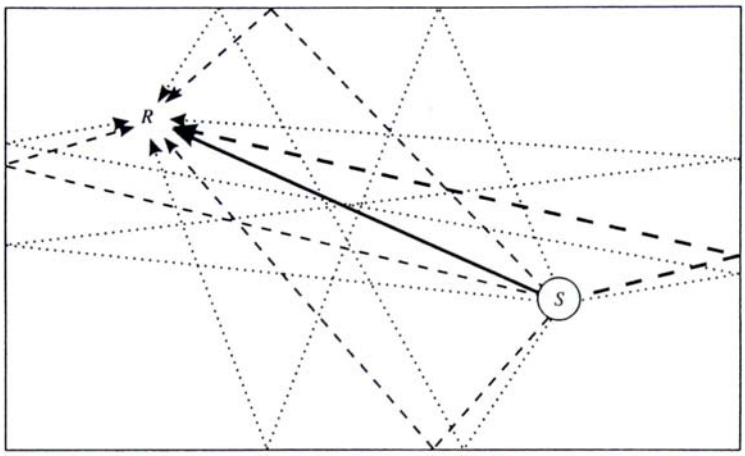


Fig. 1.5 - *Propagazione del suono in ambiente confinato.*

contributo apportato dall'energia riflessa.

Il livello di pressione sonora ad una distanza d da una sorgente sonora di livello di potenza L_W in funzione in un ambiente chiuso caratterizzato da un valore della costante R:

$$L_p = L_w + 10\log\left(\frac{Q_\Theta}{4\pi d^2} + \frac{4}{R}\right) \qquad [\mathrm{dB}]$$

dove R è la costante acustica dell'ambiente, vale $R = \frac{\sum S_i a_m}{(1 - a_m)}$,si misura in m^2; $(\frac{Q_\Theta}{4\pi d^2})$ rappresenta il contributo del campo diretto e $(\frac{4}{R})$ rappresenta il contributo del campo riverberato.

Le riflessioni rinforzano il suono diretto ma se sono eccessive o troppo deboli si ha una cattiva ricezione. Il contenuto energetico e la quantità delle riflessioni ottimali per una certa destinazione d'uso possono essere valutate grazie al tempo di riverberazione:

$$\tau_{60} = 0.163 \frac{V}{A_{tot}} \qquad [s]$$

Questa espressione è stata proposta dallo studioso americano *Wallace Clement Sabine* (1868-1919), che per primo, verso la fin dell'Ottocento stabilì la relazione che lega il tempo di riverberazione di un ambiente alle sue dimensioni e all'assorbimento acustico dell'ambiente.

Convenzionalmente il tempo di riverberazione è definito come l'intervallo di tempo necessario affinché, al cessare dell'attività della sorgente, il livello della pressione sonora decada di 60 dB.

Molto spesso non è possibile però ottenere un decadimento di 60 dB del livello di pressione sonora perché può esserci un rumore di fondo piuttosto alto tanto che le apparecchiature non sono in grado di produrre un suono che lo superi di 60 dB. In questo caso sarà sufficiente che il suono si attenui di 30 dB per cui i τ_{60} si otterrà per estrapolazione.

Da un punto di vista normativo si fa riferimento alla norma ISO 3382 che definisce il tempo di riverberazione come il tempo necessario affinché il livello di pressione sonora presente nell'ambiente, in condizioni stazionarie, decresca di 60 dB, a un tasso di decadimento dato dalla regressione lineare della curva di decadimento, misurata da un livello 5 dB .

Il tempo di riverberazione da solo non può essere un parametro affidabile della qualità di un ambiente, né può caratterizzare il suo ambiente sonoro; infatti non si opera alcuna distinzione fra la frazione di energia utile all'ascolto, che perviene agli ascoltatori con un ritardo modesto rispetto all'onda diretta e la parte di energia che giunge con maggiore ritardo e risulta così disturbante.

Nel prossimo capitolo parlerò di quei parametri oggettivi che negli anni sono stati studiati e che accompagnano il tempo di riverberazione in una corretta qualificazione acustica degli ambienti.

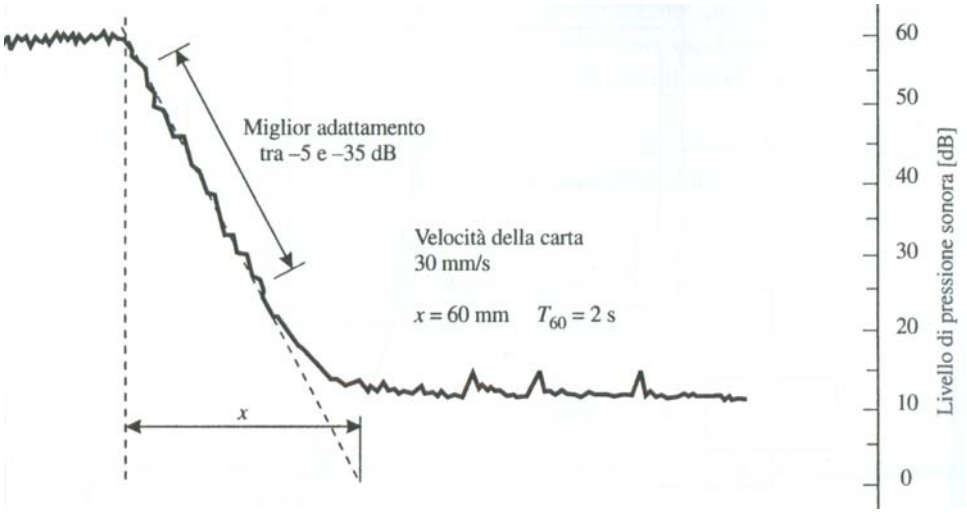


Fig. 1.6 - *Determinazione del tempo di riverberazione dal rilievo del transitorio di estinzione del suono*

1.8 Bibliografia

1. A. ASTOLFI, *Schede di fisica tecnica ambientale, Acustica,* Torino, Politeko, 2001
2. R. SPAGNOLO, *Manuale di Acustica*, Torino, UTET, Marzo 2001
3. AA.VV., *Acustica nell'edilizia*, Torino, Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris, 1998
4. E. CIRILLO, *Acustica Applicata*, Milano, Mc Graw-Hill, 1997
5. F. ALTON EVEREST, *Manuale di Acustica*, Milano, Ulrico Hoepli, 1996