Politecnico di Milano

Scuola di Architettura Urbanistica Ingegneria delle Costruzioni

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Sistemi Edilizi

IL COMFORT ACUSTICO NEGLI UFFICI

PARAMETRI DESCRITTORI E SOLUZIONI PROGETTUALI

PER AMBIENTI OPEN-SPACE

Relatore: Prof. Livio Mazzarella

Correlatore: Ing. Roberto Fumagalli

Tesi di laurea di:

Mattia Sarno

Matricola 928584

Anno Accademico 2024/2025

Ringraziamenti

A me, te, e tutti chi di dovere.

S'io avessi, lettor, più lungo spazio
da scrivere, i' pur cantere' in parte
lo dolce ber che mai non m'avria sazio;

Ma, perché piene son tutte le carte
ordite a questa cantica seconda,
non mi lascia più ir lo fren dell'arte.

Io tornai dalla santissim'onda
rifatto sì, come piante novelle
rinnovellate di novella fronda,

puro e disposto a salire alle stelle.

Sommario

Premessa 4

1. La qualità acustica degli ambienti confinati 5

1.1. Classificazione e concetti generali 5

1.2. Gli ambienti destinati all'ascolto della parola 6

1.2.1. Requisiti: assenza di disturbo e buona ricezione 6

1.3. Parametri 8

2. L'intelligibilità del parlato 19

2.1. Metodi soggettivi e metodi oggettivi 19

2.2. Descrizione fisica del discorso 22

2.3. La funzione di trasferimento della modulazione (*MTF*) 23

2.4. Sforzo vocale e direzionalità 25

2.5. Lo Speech Interference Level (*SIL*) 29

2.6. Lo Speech Intelligibililty Index (*SII*) 30

2.7. Lo Speech Transmission Index (*STI*) 31

2.8. Metodi per la determinazione dello *STI* 32

2.8.1. Il metodo diretto 32

2.8.2. Il metodo indiretto 36

3. Gli uffici *open-space* 52

3.1. Caratteristiche degli ambienti 52

3.2. I requisiti acustici per elevate prestazioni degli uffici *open-space* 54

3.3. Categorie ISO 2295:2020 57

3.4. I requisiti per la privacy 66

3.5. Linee guida per la progettazione acustica 74

4. Materiali fonoassorbenti 87

4.1. Riflessione, assorbimento, trasmissione 87

4.2. Materiali porosi e fibrosi 89

5. Sistemi fonoassorbenti 92
5.1. Pannelli assorbitori porosi e fibrosi 93
5.1.1. Applicazioni di pannelli porosi 94
5.2. Assorbitori risonanti 96
5.3. Assorbitori risonanti con materiale poroso 98
5.4. Assorbitori a membrana 99
6. Caso studio 102
6.1. Inquadramento e descrizione dell'ambiente 102
6.2. Strumentazione utilizzata 106
6.3. Condizione *pre operam* 107
6.3.1. Tempo di riverberazione T_{60} – Pre 107
6.3.2. Speech Transmission Index *STI* – Pre 110
6.3.3. Indice di Chiarezza C_{50} – Pre 112
6.3.4. Indice di attenuazione spaziale del livello sonoro ponderato A del parlato al raddoppio della distanza dalla sorgente $D_{2,S}$ – Pre 114
6.3.5. Livello sonoro ponderato A del discorso parlato normale a 4 m dalla sorgente $L_{p,A,S,4m}$ – Pre 114
6.3.6. Distanza di distrazione r_D – Pre 115
6.4. Condizione *post operam* 116
6.4.1. Tempo di riverberazione T_{60} – Post 116
6.4.2. Speech Transmission Index *STI* – Post 121
6.4.3. Indice di Chiarezza C_{50} – Post 122
6.4.4. Indice di attenuazione spaziale del livello sonoro ponderato A del parlato al raddoppio della distanza dalla sorgente $D_{2,S}$ – Post 123
6.4.5. Livello sonoro ponderato A del discorso parlato normale a 4 m dalla sorgente $L_{p,A,S,4m}$ – Post 124
6.4.6. Distanza di distrazione r_D – Post 124
6.5. Condizione *post operam* con occupazione di persone 125

6.5.1. Tempo di riverberazione T_{60} – Post con occupazione di persone..... 125

6.5.2. Speech Transmission Index *STI* – Post con occupazione di persone 128

6.5.3. Indice di Chiarezza C_{50} – Post con occupazione di persone..... 129

6.5.4. Indice di attenuazione spaziale del livello sonoro ponderato A del parlato al raddoppio della distanza dalla sorgente $D_{2,S}$ – Post con occupazione di persone.. 130

6.5.5. Livello sonoro ponderato A del discorso parlato normale a 4 m dalla sorgente $L_{p,A,S,4m}$ – Post con occupazione di persone..... 130

6.5.6. Distanza di distrazione r_D – Post con occupazione di persone..... 131

7. Confronto fra le fasi di progetto 132

8. Conclusioni..... 134

Bibliografia..... 138

Premessa

Le caratteristiche acustiche di un ambiente concorrono in maniera fondamentale a tutto quello che è inteso come “sistema edilizio”.

Non è un caso che, sia da parte dei tecnici sia da parte degli utenti dell’edificio, negli ultimi anni si sia manifestata una maggiore sensibilizzazione verso questi temi. Infatti, periodicamente vengono aggiornate leggi, sviluppate normative e ricercati metodi che vanno a definire sempre più nel dettaglio ogni tipologia di ambiente e la relativa destinazione d’uso.

In questa trattazione verranno descritti tutti quegli indicatori che possono essere utilizzati per definire l’acustica di un ambiente, in modo tale da ricondurre una sensazione soggettiva ad un parametro fisico-matematico, cioè convertire una percezione empirica in numeri.

Fra questi, l’attenzione verrà focalizzata sulle grandezze che permettono di definire gli uffici *open-space*, molto diffusi nei tempi recenti: *Tempo di riverberazione* T_{60}, *Speech Transmission Index STI*, *Indice di Chiarezza* C_{50}, *Indice di attenuazione spaziale del livello sonoro ponderato A del parlato al raddoppio della distanza dalla sorgente* $D_{2,S}$, *Livello sonoro ponderato A del discorso parlato normale a 4 m dalla sorgente* $L_{p,A,S,4m}$ e *Distanza di distrazione* r_D.

Oggetto di studio sarà un ufficio di A.T.M., l’Azienda Trasporti Milanesi (presso la quale lavoro) nella nuova sede di Via Fabiani 1 a San Donato Milanese (MI).

Per questo ambiente verranno calcolati tutti i parametri e valutate le diverse soluzioni progettuali che permettono di rendere acusticamente confortevole la sede di lavoro, partendo dallo stato dell’arte fino ad arrivare alla consegna dell’elaborato, comprensiva di una stima dei costi d’intervento.

La nuova struttura aziendale risulta ancora non completamente ultimata, e pertanto non è stato possibile effettuare misurazioni *in situ*. Di conseguenza, le elaborazioni vengono svolte tramite metodi di calcolo previsionali, non identificativi come una misura fonometrica, ma certamente rappresentativi ed affidabili.

Il confronto fra i risultati ottenuti permetterà di effettuare osservazioni di carattere generale e particolare del progetto, e di trarne le relative conclusioni.

1. La qualità acustica degli ambienti confinati

1.1. Classificazione e concetti generali

Gli ambienti destinati al pubblico possono essere distinti in due macro-categorie: quelli in cui vengo forniti servizi specifici, cioè tutte le sale in cui il pubblico può accedere liberamente e ne è fruitore (come sale d'aspetto, ristoranti, supermercati, musei, ecc.) e quelli in cui vengono svolte, per il pubblico, particolari funzioni (come teatri, auditorium, cinema, discoteche, sale convegni, edifici di culto, sale polifunzionali, palazzetti dello sport, ecc.).

Già questa semplice classificazione evidenzia i diversi requisiti e le specifiche prestazioni acustiche che stanno alla base delle due categorie ora riportate: per la prima si richiede il conseguimento di condizioni globali di comfort o benessere psicofisico, per la seconda si mira più a quelle condizioni in cui nello specifico l'acustica risulta di fondamentale importanza, in quanto il buon ascolto è aspetto prioritario.

Allo stesso modo, risulta inoltre evidente come sia impossibile individuare un unico indice di qualità acustica che esprima la sensazione provata da una significativa percentuale di ascoltatori, proprio per la complessa interazione fra percezione sonora, condizioni psicofisiche di un soggetto e natura dell'evento sonoro.

È possibile però analizzare la qualità acustica di un ambiente utilizzando alcuni indici che permettono di ricondurre diversi aspetti della percezione sonora a giudizi soggettivi ben individuabili, in riferimento a condizioni di ascolto differenti.

1.2. Gli ambienti destinati all'ascolto della parola

Il caso di ascolto della parola prevede che si instauri una situazione di compromesso, in quanto le onde riflesse possono contribuire al rinforzo del livello diretto, senza che una coda sonora troppa prolungata possa mascherare i segnali che si succedono di volta in volta (per questo la grandezza oggettiva più immediata è il *tempo di riverberazione*).

Esattamente come per l'ascolto della musica, si è compresa l'importanza che hanno le prime riflessioni (vale a dire quelle riflessioni che giungono all'orecchio subito dopo l'arrivo del suono diretto) per una buona ricezione della parola.

Considerando il rapporto fra l'energia associata alle prime riflessioni e quella associata alle riflessioni successive, sono stati definiti alcuni indici che riguardano la nitidezza del segnale ricevuto. Questi parametri, detti *criteri della frazione energetica*, si fondano sull'idea che per la percezione soggettiva di un suono contribuisca positivamente solo la parte iniziale dell'energia, mentre la parte che segue viene considerata peggiorativa o al limite ininfluente. Infatti, secondo Cramer, risulta superfluo considerare i dettagli della risposta all'impulso oltre il tempo $t_{st} = \sqrt{V}$, espresso in ms, dove V è il volume dell'ambiente [9], poiché la parte precedente del segnale è interamente integrata dall'orecchio.

1.2.1. Requisiti: assenza di disturbo e buona ricezione

Per quanto riguarda la qualità degli ambienti destinati all'ascolto della parola, i requisiti basilari sono l'*assenza di disturbo* e la *buona ricezione*: soddisfarli entrambi significa ottenere condizioni ottimali di *intelligibilità della parola*.

Con *assenza di disturbo* si intende sia l'assenza di rumore di fondo, che maschera il suono prodotto dall'oratore, sia la mancanza di un suono non gradito, che potrebbe provocare una sensazione uditiva sgradevole e fastidiosa.

La *buona ricezione* è invece legata alla presenza di un sufficiente livello sonoro in ambiente e alla percezione ottimale delle onde sonore dirette e riflesse dalle superfici che lo delimitano.

La rappresentazione grafica dell'andamento nel tempo della pressione sonora *p(t)* in un punto dell'ambiente eccitato con un segnale impulsivo è detta *ecogramma della pressione*

sonora; in altre parole, questo mostra la successione delle riflessioni che arrivano fino al punto di osservazione.

1.3. Parametri

Qui di seguito vengono riportati i principali parametri di qualità acustica [10].

D o Definizione

$$D = \frac{\int_0^{50\ ms} p^2(t)\ dt}{\int_0^{\infty} p^2(t)\ dt} \tag{1}$$

dove:

p(t) è la pressione sonora, intesa come risposta all'impulso emesso da una sorgente non direttiva;

t = 0 è l'istante in cui il suono diretto giunge nel punto di osservazione.

Questa espressione, introdotta da Thiele, indica il rapporto fra l'energia che giunge all'ascoltatore entro i primi 50 ms e l'energia di tutto il segnale.

I valori di riferimento, in %, per il parlato risultano $50 \leq D \leq 100$, per la musica $D < 50$.

R o Massa della sala

$$R = 10 \log\left(\frac{\int_{50\ ms}^{\infty} p^2(t)\ dt}{\int_0^{50\ ms} p^2(t)\ dt}\right) \tag{2}$$

L'espressione, introdotta da Beranek e Shultz, identifica il rapporto in dB fra l'energia che giunge all'ascoltatore da 50 ms fino alla fine del decadimento del segnale e l'energia dei primi 50 ms: è quindi un rapporto fra energia riverberata ed energia diretta.

C o Chiarezza

$$C_{50} = 10 \log \left(\frac{\int_0^{50\ ms} p^2(t)\ dt}{\int_{50\ ms}^{\infty} p^2(t)\ dt} \right) = -R \qquad (3)$$

Questa espressione, proposta da Reichart e dal gruppo di Dresda, rappresenta il rapporto, sempre in scala logaritmica, fra l'energia che giunge all'orecchio entro i primi 50 ms e l'energia che arriva negli istanti successivi fino alla fine del decadimento del segnale. I valori di riferimento, in dB, non sono stati ancora ben definiti.

Alcuni docenti dell'Università di Parma indicano un intervallo $-2 \leq C_{50} \leq 2$ [11], da documenti rilasciati dalle Università di Firenze [12] e Perugia [13] si riscontra la relazione $C_{50} > 3$, la norma UNI 11367:2010 [6] specifica invece che, per ambienti adibiti al parlato, si hanno valori consigliati di chiarezza $C_{50} \geq 0$, per ambienti adibiti ad attività sportive $C_{50} \geq -2$.

Attualmente sono in corso delle ricerche da parte dell'UNI per la pubblicazione delle parti che seguono la UNI 11532-1:2018 [5]; i valori ad oggi riportati sono $C_{50} > 2$ per volumi fino a 250 m^3, $C_{50} > 0$ per volumi superiori, entrambi nella configurazione ad ambiente arredato non occupato.

Per la musica si usa la stessa espressione, facendo attenzione nel sostituire i 50 ms con 80 ms.

$$C_{80} = 10 \log \left(\frac{\int_0^{80\ ms} p^2(t)\ dt}{\int_{50\ ms}^{\infty} p^2(t)\ dt} \right) \qquad (4)$$

I valori di riferimento, sempre in dB, sono $-4 \leq C_{80} \leq 2$.

Come indicato nella UNI 11532-1:2018 [5], la chiarezza C_{50} può essere determinata, per ciascuna banda d'ottava *f* considerata:

- approssimativamente (valore globale per l'ambiente) in funzione del tempo di riverberazione *T*, con la formula:

$$C_{50,f} = 10 \log\left(e^{\frac{0,691}{T_f}} - 1\right) \tag{5}$$

- in modo puntuale (valore per ogni punto del volume), tramite la teoria di Barron e Lee, in funzione del volume dell'ambiente V [m^3], del tempo di riverberazione T e della distanza sorgente-ricevitore r, con la formula:

$$C_{50,f} = 10 \log\left(\frac{\frac{100}{r^2} + e^{\frac{-0,04\,r}{T_f}}\left(\frac{31200\,T_f}{V}\right)\left(1 - e^{\frac{-0,691}{T_f}}\right)}{e^{\frac{-0,04\,r}{T_f}}\left(\frac{31200\,T_f}{V}\right)\left(e^{\frac{-0,691}{T_f}}\right)}\right) \tag{6}$$

Esiste inoltre una relazione che lega le grandezze C_{50} e D, definite rispettivamente dalle equazioni (3) e (1), e che permette di ottenere una grandezza in funzione dell'altra:

$$10 \log\left(\frac{1 - D}{D}\right) = -C_{50} \tag{7}$$

t o Istante baricentrico dell'energia o Tempo centrale

$$t_s = \frac{\int_0^\infty t\, p^2(t)\, dt}{\int_0^\infty p^2(t)\, dt} \tag{8}$$

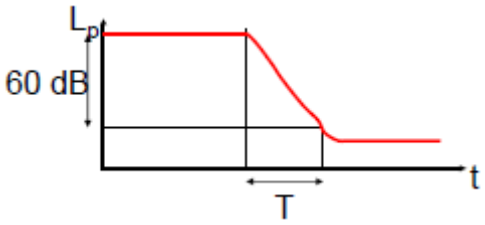
L'espressione, introdotta da Cremer e Kurer [10], rappresenta il rapporto fra l'energia dell'intero decadimento, pesata rispetto al tempo, e l'energia complessiva. È un parametro molto sensibile alla posizione occupata da un ascoltatore all'interno di una sala ed è estremamente correlato all'intelligibilità della parola.

I valori di riferimento, in secondi, per il parlato risultano $0 \leq t_s \leq 50$, per la musica $50 \leq t_s \leq 250$.

T_{60} o Tempo di riverberazione convenzionale

Il parametro definisce il tempo [s] che ci vuole per far diminuire di 60 dB un suono diretto o un segnale impulsivo interrotto bruscamente, in regime stazionario, e serve per studiare gli effetti della "coda sonora" generata dalle onde riflesse e la loro interazione con il campo sonoro diretto. È considerato una proprietà dell'ambiente.

Sulla base di indagini empiriche viene formulata la *Legge di Sabine* (1922):



$$T_{60} = \frac{0{,}16 \cdot V}{A} \tag{9}$$

dove:

V è il volume della sala [m^3];

A è la superficie di assorbimento equivalente totale dell'ambiente [m^2].

Il parametro A, che caratterizza la capacità dell'ambiente di assorbire le onde sonore, è funzione delle superfici riflettenti e fonoassorbenti e degli elementi umani o di arredo presenti nel locale secondo la relazione:

$$A = \sum_{i=1}^{k} S_i \alpha_i + \sum_{j=1}^{m} n_j A_j \tag{10}$$

dove:

S_i è la superficie i-esima [m^2];

α_i è il coefficiente di assorbimento della superficie i-esima;

n_j è il numero di elementi del j-esimo tipo;

A_j è l'assorbimento totale di un elemento del j-esimo tipo.

La Formula di Sabine comprende delle ipotesi o assunzioni di base:

i. esiste un libero cammino medio (distanza media fra due urti consecutivi), analogo a quello della Teoria cinetica dei gas [m]:

$$l = \frac{4V}{S} \tag{11}$$

ii. il campo sonoro è diffuso (ipotesi difficile da realizzare nella pratica)
iii. l'ambiente ha caratteristiche regolari (proporzionate)
iv. nell'ambiente è presente un basso assorbimento acustico ($\alpha \leq 0{,}2$-$0{,}3$)
v. l'assorbimento è uniformemente distribuito nella stanza ($\bar{\alpha}$ coefficiente di assorbimento acustico medio):

$$\bar{\alpha} = \sum_k \frac{\alpha_k S_k}{S} \tag{12}$$

vi. la derivazione della formula considera infinitesimi di urto *dn* nell'intervallo *dt*

Fisicamente, in ambienti molto assorbenti ($\alpha \approx 1$) il tempo di riverberazione dovrebbe essere praticamente nullo ($T \approx 1$), perché le superfici di contorno assorbono tutto il suono); invece la Formula di Sabine restituisce un valore non nullo:

$$T \underset{\bar{\alpha}\to 1}{\longrightarrow} 0{,}16\frac{V}{S} \neq 0 \tag{13}$$

Possiamo quindi assumere che la Formula cade in difetto per ambienti molto fonoassorbenti.

Per generalizzare la Formula di Sabine, cioè comprendere anche i casi in cui $T \to 0$ quando $\alpha \to 1$, si ricorre alla *Formula di Norris-Eyring,* che considera solo urti discreti dell'energia sonora sulle pareti:

$$T = -0{,}16\frac{V}{S \cdot \ln(1-\bar{\alpha})} \tag{14}$$

Facendo ulteriori considerazioni, se volessimo considerare anche la diversa distribuzione dell'assorbimento sulle superfici di contorno dell'ambiente e ambienti con geometria non regolare (ISO 12354-6), vale la *Formula di Arau*:

$$T = \left[\frac{0{,}16 \cdot V}{-S \cdot \ln(1-\overline{\alpha_x})}\right]^{\frac{S_x}{S}} \cdot \left[\frac{0{,}16 \cdot V}{-S \cdot \ln(1-\overline{\alpha_y})}\right]^{\frac{S_y}{S}} \cdot \left[\frac{0{,}16 \cdot V}{-S \cdot \ln(1-\overline{\alpha_z})}\right]^{\frac{S_z}{S}} \tag{15}$$

dove:

S_x, S_y, S_z sono le superfici complessive della coppia di pareti opposte ed orientate sullo stesso asse [m^2]

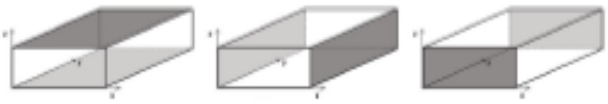
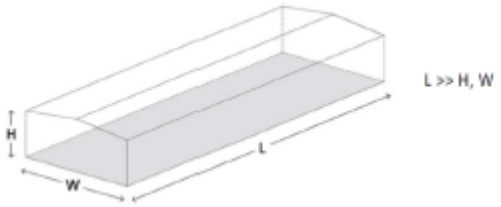
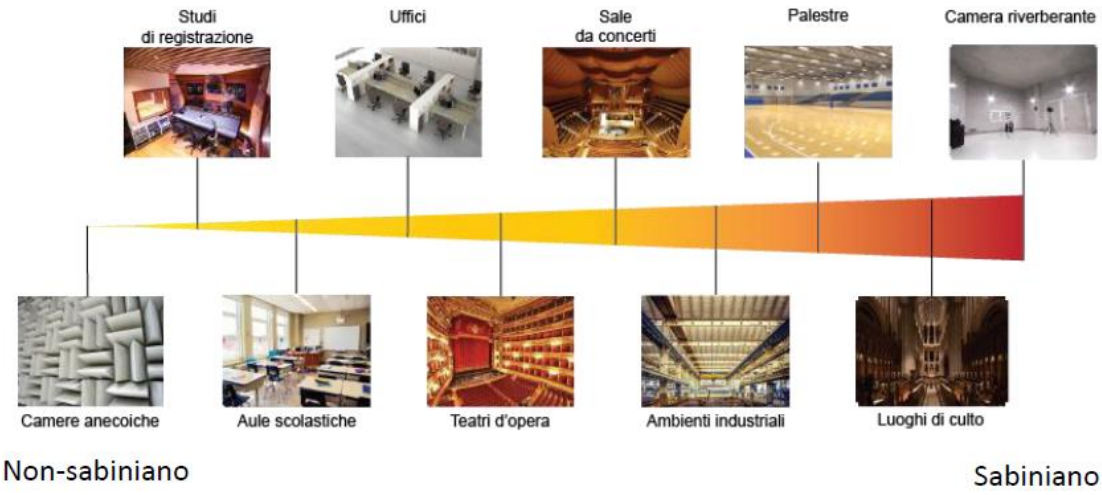


Figura 1 - Superfici e ambiente di Arau

α_x, α_y, α_z sono i coefficienti di assorbimento acustico medi della coppia di superfici opposte ed orientate sullo stesso asse



In base alle considerazioni fatte sulle tre formule per il tempo di riverberazione (Arau ⊃ Norris-Eyring ⊃ Sabine), è possibile definire ad ogni ambiente, con diverse destinazioni d'uso, il suo campo sonoro caratteristico, sabiniano o non sabiniano.



- Volume irregolare
- Materiali molto fonoassorbenti
- Distribuzione disuniforme dell'assorbimento

- Volume regolare
- Materiali poco fonoassorbenti
- Distribuzione uniforme dell'assorbimento

Figura 2 - Campo sonoro sabiniano e non sabiniano

Nelle schede tecniche dei prodotti, i coefficienti di assorbimento α variano in base alla frequenza, cioè sono più performanti nell'assorbimento in determinate bande d'ottava piuttosto che in altre. Questo significa che anche il tempo di riverberazione varierà di conseguenza in funzione della frequenza.

È importante escludere i primi 5 dB di decadimento del segnale onde evitare l'influenza delle prime riverberazioni particolarmente forti, quindi generalmente si considera la parte della curva di decadimento compresa fra -5 dB e -30 dB.

I valori di riferimento per il parlato, la lettura o il dramma risultano $0 \leq T_{60} \leq 1{,}0$, $1{,}2 \leq T_{60} \leq 1{,}8$ per i teatri d'opera, $1{,}7 \leq T_{60} \leq 2{,}3$ per le grandi sale da concerto, $2{,}0 \leq T_{60} \leq 4{,}0$ per le chiese.

Vari esperimenti hanno condotto alla stesura di alcune formule che indicano un tempo di riverberazione ritenuto ottimale per certe destinazioni d'uso (Figura 3), da confrontare con quello trovato in ambiente.

A 1000 Hz si definisce un T_{60} ottimale [s] con l'espressione:

$$T_{60,ott,1000Hz} = k\sqrt[9]{V} \tag{16}$$

dove:

V è il volume dell'ambiente [m^3];

k è un coefficiente correttivo che varia in base alla destinazione d'uso: per gli ambienti destinati alle attività del parlato $k = 0{,}30$, per i cinema $k = 0{,}40$, per i teatri $k = 0{,}50$, per le sale da concerto di musica classica $k = 0{,}55$.

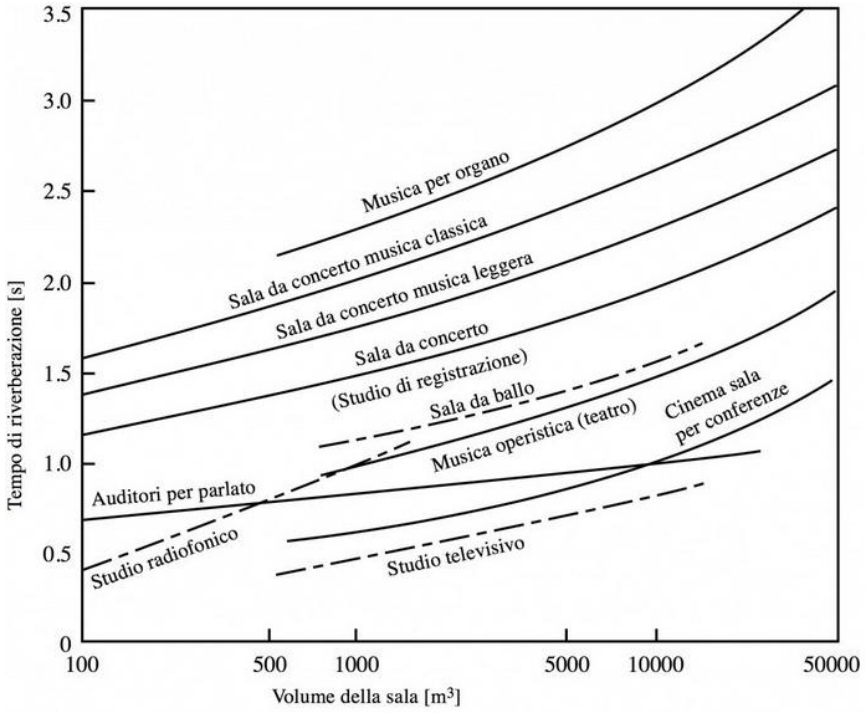


Figura 3 - $T_{60,ott}$ in funzione della destinazione d'uso dell'ambiente

Il $T_{60,ott}$ alle varie frequenze si ricava moltiplicando il valore trovato ai 1000 Hz per i coefficienti di proporzionalità riportati in Tabella 1.

f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Coeff.[adim]	1,75	1,30	1,10	1,00	1,05	1,10

Tabella 1 - Coefficienti di proporzionalità per il tempo di riverberazione ottimale

L'Appendice C della norma UNI 11367:2010 *Classificazione acustica delle unità immobiliari* [6] indica una serie di relazioni per la determinazione del tempo di riverberazione ottimale medio, cioè in un range di frequenze compreso fra i 500 e i 1000 Hz.

Anche in questo caso si riscontrano delle distinzioni in funzione della destinazione d'uso del locale:

- per ambienti dedicati alle attività del parlato:

$$T_{60,ott} = 0{,}34 \log V + 0{,}03 \qquad (17)$$

- per ambienti dedicati alle attività sportive:

$$T_{60,ott} = 1{,}27 \log V - 2{,}49 \tag{18}$$

dove V è sempre il volume dell'ambiente [m^3].

Nel caso di misura in opera, il tempo di riverberazione T_{60} risulta verificato se vale la condizione:

$$T_{60} \leq 1{,}2\, T_{60,ott} \tag{19}$$

per ogni frequenza compresa fra 250 Hz e 4000 Hz.

T_{10}* o *EDT* o *Tempo di Primo Decadimento* o *Early Decay Time

Introdotto da Jordan [10], rappresenta la prima parte del processo di riverberazione e definisce il tempo che ci vuole per far diminuire di 10 dB un suono diretto o un segnale impulsivo interrotto bruscamente. Viene calcolato attraverso la *retta di regressione lineare*. L'*EDT* diminuisce allontanando il microfono dalla sorgente ed è un ottimo strumento di confronto fra i vari punti di una sala.

I valori di riferimento si collocano nella disequazione 1,8 s ≤ T_{10} ≤ 2,6 s.

T_{15}* o *IRT* o *Tempo di Riverberazione Iniziale* o *Initial Reverberation Time

Introdotto da Atal, Schroeder e Sessler [10], il parametro considera la pendenza media dei primi 15 dB del decadimento del livello di pressione sonora calcolata a -60 dB (metodo della *retta di regressione lineare*).

Per questo parametro non esistono valori di riferimento in letteratura.

T_{20}* o *ANZ* o *Tempo di Riverberazione Iniziale

Introdotto da Kurer e Kurze, il parametro considera la pendenza media dei primi 20 dB del decadimento del livello di pressione sonora calcolata a -60 dB (metodo della *retta di regressione lineare*). Anche per questo parametro non esistono valori di riferimento in letteratura.

Come oramai appurato, il suono diretto gioca un ruolo fondamentale nell'ascolto in generale, parola o musica che sia. Volendo misurare il livello sonoro percepito dall'ascoltatore, in relazione alla posizione e alla potenza di emissione della sorgente, si definisce un'ulteriore grandezza:

G* o *Indice di intensità

$$G = 10 \log \left(\frac{\int_0^{\infty} p^2(t)\, dt}{\int_0^{\Delta t} p_s^2(s,t)\, dt} \right) \tag{20}$$

dove:

p(t) è la risposta, nel punto di osservazione, ad un impulso emesso da una sorgente omnidirezionale;
p(s,t) è la risposta allo stesso impulso in un punto fisso nella sala a distanza s dalla sorgente (considerata 5 m);
Δt è la durata dell'impulso diretto.

L'indice *G* può anche essere espresso tramite la relazione:

$$G = L_p - L_w \tag{21}$$

che rappresenta la differenza, in dB, fra il livello della pressione sonora nel punto di ascolto ed il livello della potenza sonora emessa dalla sorgente.

I valori di riferimento risultano maggiori o uguali di: -35 per una grande orchestra e cantanti molto allenati, -30 per una piccola orchestra e cantanti allenati, -25 per oratori e attori allenati, -20 per strumenti deboli e oratori poco allenati.

Esistono inoltre altri parametri per definire ulteriormente o alternativamente la qualità acustica di un ambiente. Se ne riporta soltanto il nome e la simbologia, perché fortemente specifici in ambito musicale o di grandi ambienti, e quindi non interessanti ai fini di questa trattazione. Essi sono:

- *Tempo iniziale di ritardo*
- *T_{med} o Tempo di riverberazione alle medie frequenze*
- *Bass ratio o Rapporto dei bassi*
- *EEB o Early Energy Balance o Equilibrio dell'Energia Iniziale*
- *St o Supporto*
- *TB o Tonal Balance o Equilibrio Tonale*
- *L_f o Lateral Fraction o Frazione della prima energia laterale*
- *SI o Spatial Impression o Impressione Spaziale*
- *R o Impressione della sala*
- *LE o Lateral Efficienty o Efficienza Laterale*
- *K o Funzione di correlazione mutua internaturale*
- *IAFC i Funzione di correlazione binaurale*

2. L’intelligibilità del parlato

2.1. Metodi soggettivi e metodi oggettivi

Per prima cosa, va chiarita la differenza fra i concetti di *udibilità* e di *intelligibilità*, ovvero fra la capacità di percepire la presenza di un messaggio, legata solamente al livello sonoro che il messaggio possiede, e la capacità di comprendere il significato del messaggio stesso da parte dell’uditore.

Un suono è udibile quando si è in grado di percepire la sua presenza. Aumentando il livello di tale suono, aumentano la sua udibilità e la sua percezione (rimanendo in ogni caso entro certi limiti fisiologici).

L’udibilità è quindi fattore sicuramente necessario, ma non è l’unico a concorrere riguardo la facilità con cui il messaggio viene compreso e decifrato da colui che ascolta.

Per rendere più chiara l’idea, si ricorre ad una analogia (o meglio una metafora) fra il suono e la scrittura. Partendo dal concetto di udibilità, si ponga attenzione alla Figura 4 seguente:

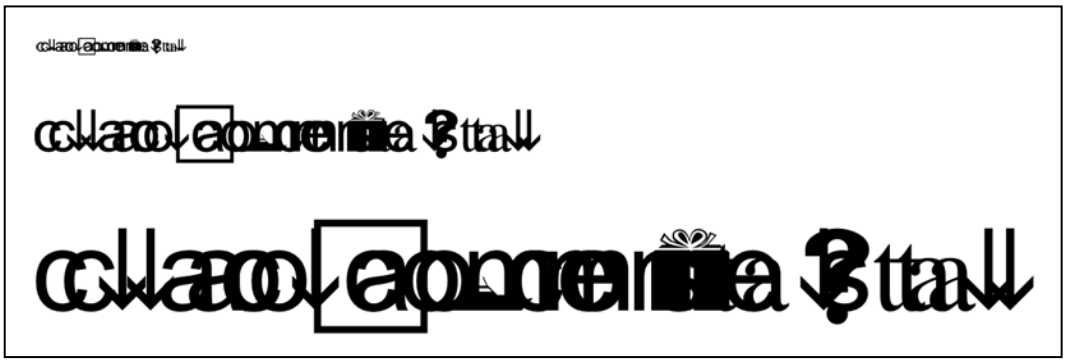


Figura 4 - Concetto di *udibilità*

Questa figura mostra una frase molto semplice, in cui la dimensione del carattere viene aumentata diventando sempre più visibile. L’aumentare delle dimensioni del carattere equivale per analogia all’aumentare del livello sonoro.

Risulta evidente che anche nel terzo caso la frase non risulti proprio comprensibile, nonostante sia ben visibile (e quindi, nel nostro riferimento, ben udibile).

Per fare in modo che il messaggio venga compreso, bisogna farlo arrivare all'uditore in maniera chiara, e conseguentemente bisogna agire su alcuni dei parametri prima descritti, permettendo al suono di raggiungere una elevata intelligibilità.

La frase scritta in precedenza era infatti costituita da un messaggio ben definito inviato dall'oratore, ma in termini acustici sporcato, sovrapposto e distorto da altri suoni o distorsioni durante il percorso, rendendo di fatto i singoli suoni che compongono la frase tra loro poco o per nulla distinguibili. Ciò è stato testualmente rappresentato semplicemente andando a sostituire alcune lettere con dei caratteri alternativi e/o a sovrapporre, sfalsandole leggermente, le stesse. Ora, ipotizzando di diminuire il disturbo acustico legato al canale di trasmissione, andremo via via a ripulire dai vari disturbi la frase, ottenendo così la Figura 5 sottostante:

Figura 5 - Concetto di *intelligibilità*

Tutte le tre frasi risultano ben udibili (se ne può infatti individuare la presenza, cioè visualizzarle bene), ma non è possibile comprendere il messaggio della prima frase. La seconda frase mostra un miglioramento e la terza risulta udibile in termini di livello sonoro allo stesso modo della prima, ma al contrario di questa risulta perfettamente nitida e ben definita. Ricorrendo all'analogia acustica, ciò equivale ad avere un suono pulito e chiaro, con conseguente intelligibilità elevata.

In sostanza, il potenziale messaggio che un ipotetico parlatore (o impianto di riproduzione acustica) voleva inviare ad un uditore, viene perfettamente compreso da

quest'ultimo, a differenza della prima frase in cui chi ascolta percepisce la presenza di suoni ma non riesce a comprenderne il significato.

Alla base della comunicazione verbale si pone la corretta comprensione del messaggio trasmesso. La qualità di questa trasmissione però essere compromessa da alcune caratteristiche acustiche dell'ambiente (come, ad esempio, l'eccessivo tempo di riverberazione o la presenza di rumore di fondo) e dalle peculiarità di emissione della voce umana (in particolare al suo sforzo compiuto dall'oratore, alla sua composizione in frequenza, all'andamento temporale e alla direzionalità, oltre che a fattori di natura linguistica, fra cui la struttura grammaticale e semantica della lingua).

L'intelligibilità della parola può essere valutata con metodi soggettivi e metodi oggettivi.

I metodi soggettivi consistono nella realizzazione di test di intelligibilità tra parlatori e gruppi di ascoltatori utilizzando frasi o parole in rima. Si tratta però di metodi molto lunghi da eseguire, e la loro laboriosità ha suscitato l'esigenza di trovarne di più rapidi.

Questa velocità di applicazione si raggiunge con i vari metodi oggettivi, tra i quali i più comuni sono le *Speech Interference Level* (*SIL*), lo *Speech Itelligibility Index* (*SII*) e lo *Speech Transmission Index* (*STI*).

2.2. Descrizione fisica del discorso

Per determinare gli indici sopra riportati si parte dal presupposto che nel parlato continuo l'intensità del segnale (proporzionale al quadrato della pressione acustica) sia variabile nel tempo, determinando così una variazione di inviluppo (nella teoria delle onde, l'inviluppo è la linea che si ottiene congiungendo i successivi picchi di un'oscillazione modulata in ampiezza).

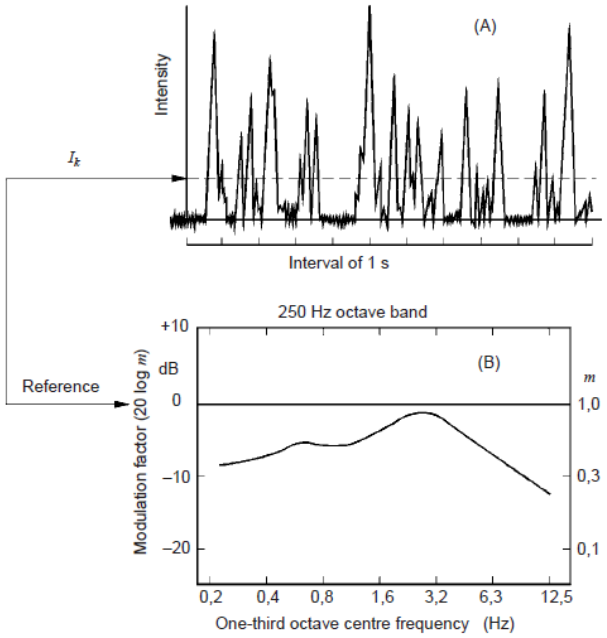


Figura 6 - Esempio di inviluppo di intensità di un segnale parlato continuo nella banda d'ottava di 250 Hz e corrispondente spettro di inviluppo

Nell'inviluppo dell'intensità, fluttuazioni lente corrispondono alle parole e alle frasi, fluttuazioni veloci corrispondono ai fonemi contenuti nelle parole. Nel 1973 Houtgast e Steeneken affermavano che si avranno ottime condizioni di intelligibilità se verranno mantenute invariate le caratteristiche iniziali di inviluppo. In campo pratico, si rappresenta il parlato con un segnale di test che consiste in un rumore casuale modulato sinusoidalmente in intensità (tipicamente un rumore rosa nelle bande di frequenza del parlato, modulato sinusoidalmente in intensità con frequenze di modulazione rappresentative del parlato continuo). Si avranno quindi ottime condizioni di intelligibilità se rimangono invariate le caratteristiche iniziali di modulazioni esprimibili con l'indice di modulazione, variabile fra 0 e 1, e che descrive la profondità di modulazione della funzione intensità.

2.3. La funzione di trasferimento della modulazione (*MTF*)

Il rumore di fondo, il riverbero e l'eco presenti nell'ambiente riducono l'ampiezza di modulazione del segnale ricevuto secondo una funzione di trasferimento della modulazione, la *Modulation Transfer Function* (*MTF*), che quantifica la riduzione dell'indice di modulazione del segnale di test in funzione della frequenza di modulazione, dall'emissione alla ricezione.

Per ogni frequenza di modulazione *F*, la *MTF* è definita 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:

$$m(F) = \frac{m_0(F)}{m_i(F)} \tag{22}$$

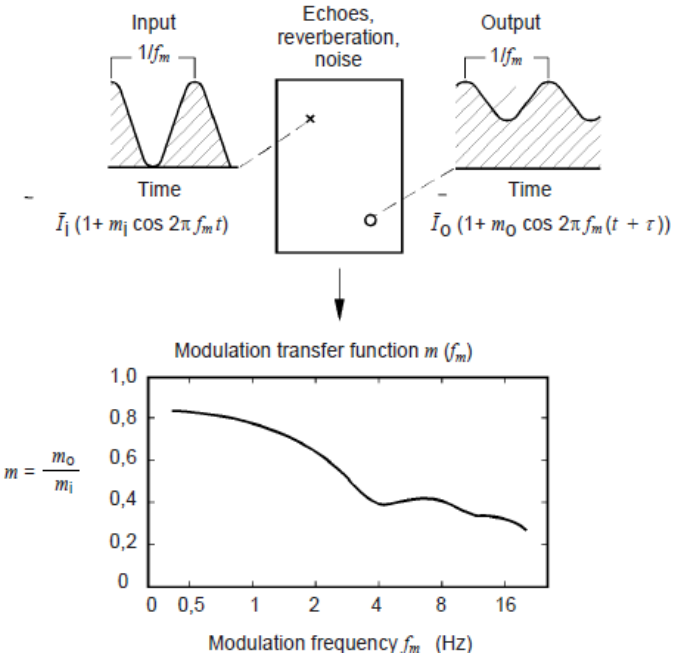


Figura 7 - Riduzione della modulazione di un segnale vocale prodotta dal rumore di fondo, dall'eco e dalla riverberazione

Viene determinata una famiglia di curve della *MTF*, ognuna delle quali è relativa a ciascuna banda d'ottava di emissione del segnale vocale ed è definita dai valori che il fattore di riduzione dell'indice di modulazione *m* assume per ogni frequenza di modulazione presente nell'inviluppo dei segnali del parlato.

I valori di tutti questi dati vengono ridotti ad un unico indice, compreso fra 0 e 1, che rappresenta l'effetto del sistema di trasmissione sull'intelligibilità. Nel calcolo si tiene conto dell'importanza che le diverse bande di frequenza hanno sull'intelligibilità.

2.4. Sforzo vocale e direzionalità

Il parlato varia in intensità in funzione dello sforzo vocale dell'oratore e in frequenza in funzione di una evoluzione spettrale legata ai fenomeni pronunciati e alla configurazione anatomica dell'apparato fonatorio dell'oratore.

Lo spettro di frequenze compreso fra i 300 Hz ed i 3000 Hz è quello di maggiore interesse per una buona intelligibilità (si tenga conto, comunque, che per alcune consonanti si può raggiungere la frequenza di 8000 Hz).

In Figura 8, fornita dalla norma ANSI S3.5 del 1997 [7], sono riportati i livelli di pressione sonora in banda d'ottava del parlato "unisex", per gli sforzi vocali normale, elevato, forte e urlato, a 1 m di distanza dalla bocca dell'oratore ed in campo libero. Vanno intesi inoltre come valori medi per messaggi di lunga durata.

Sforzo vocale	Frequenza centrale delle bande di ottava (Hz)						dB(A)
del parlatore	250	500	1000	2000	4000	8000	
Normale	57,2	59,8	53,5	48,8	43,8	38,6	59,5
Elevato	61,5	65,6	62,3	56,8	51,3	42,6	66,5
Forte	64,0	70,3	70,6	65,9	59,9	48,9	73,7
Urlato	65,0	74,7	79,8	75,8	68,9	58,2	82,3

Figura 8 - Livelli di pressione sonora del parlato «unisex» nelle diverse bande di ottava (in dB) e livello globale ponderato A, ad 1 m dalla bocca del parlatore, in campo livero, per alcuni sforzi vocali

Si riporta poi la Figura 9, in cui vengono indicati i livelli di pressione sonora ponderati A per i diversi sforzi vocali di un parlatore di sesso maschile, a 1 m di distanza dalla bocca e ricavati dai valori in dB nelle diverse bande d'ottava.

Sforzo vocale	$L_{S,A,1m}$ dB(A)
Rilassato	54
Normale	60
Elevato	66
Forte	72
Molto forte	78

Figura 9 - Sforzo vocale di un parlatore di sesso maschile e relativi livelli sonori ponderati A, a 1 m di fronte alla bocca

In generale è possibile ammettere che il parlato subisca continue fluttuazioni di livello legate al linguaggio.

Nel caso di conversazione a voce normale la dinamica della voce è di circa 30 dB, intesa come differenza fra i valori massimo e minimo del livello emesso - tolti i silenzi. I livelli massimi si riconducono ai suoni vocalici, i livelli minimi a certe consonanti sonore, che contribuiscono maggiormente all'intelligibilità del messaggio.

È importante, infine, che l'acustica dell'ambiente non faccia coprire i fenomeni consonantici, più corti, con i fenomeni vocali, più lunghi.

In Figura 10 [16] si può avere un'idea della collocazione in frequenza delle singole lettere/fonemi, in Figura 11 un esempio con l'andamento del segnale, la curva d'inviluppo e i dettagli in frequenza.

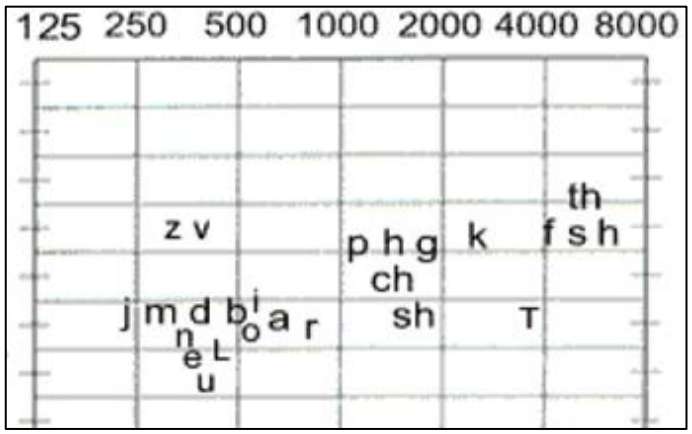
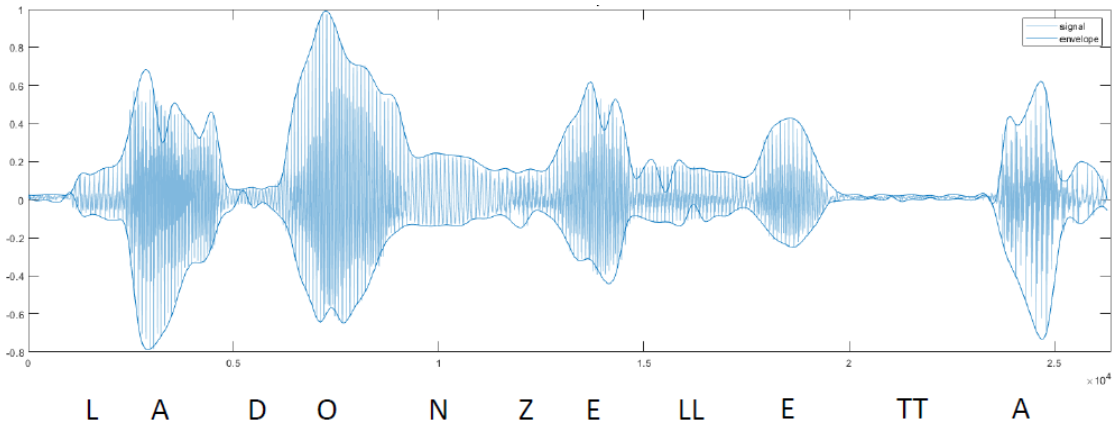


Figura 10 - Collocazione in frequenza delle singole lettere/fonemi



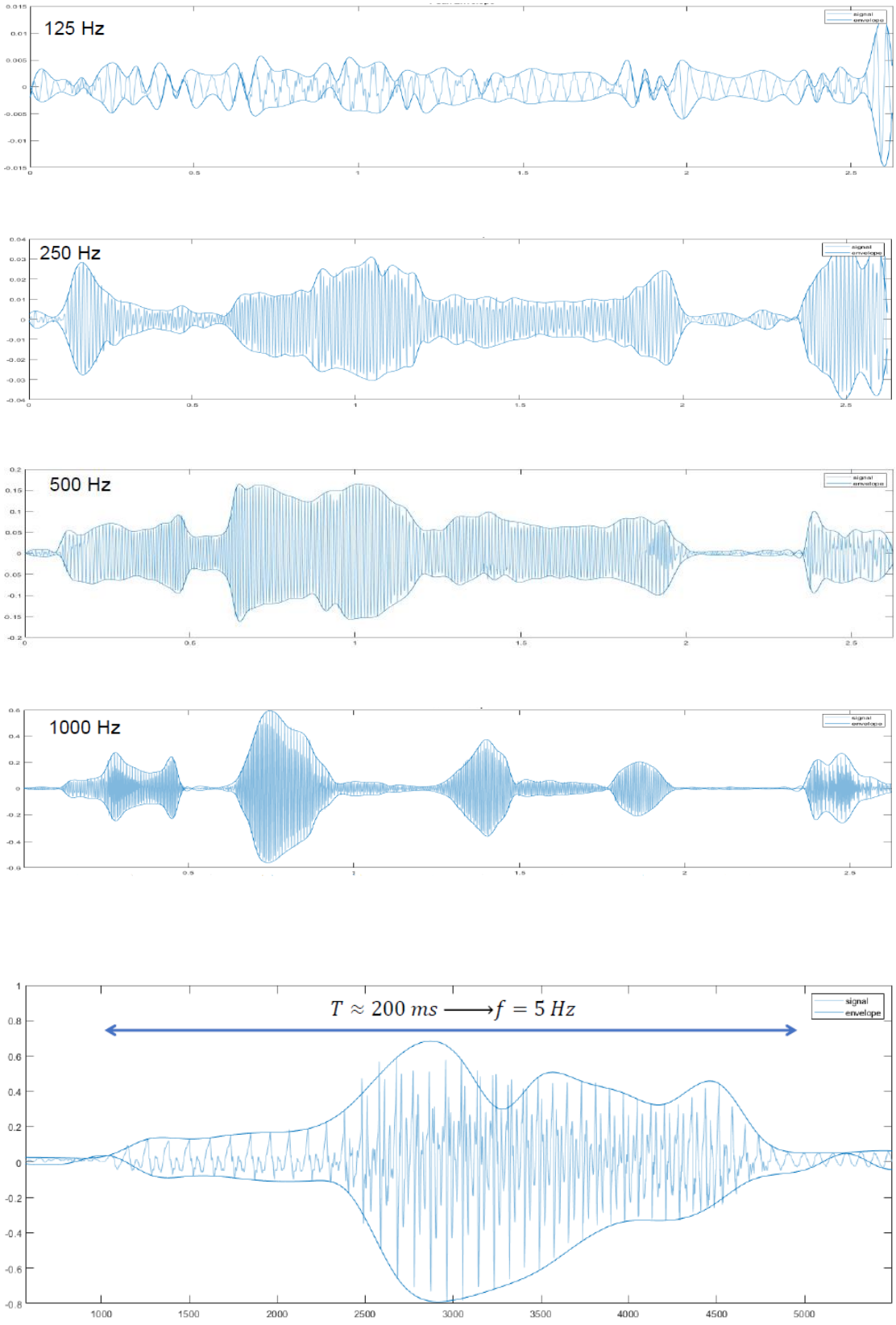


Figura 11 – Andamento del segnale di un esempio

In generale, si ricorda che nel parlato è possibile individuare diverse frequenze, tipiche della voce umana, con un campo di variabilità compreso fra i 125 e gli 8000 Hz, come espresso in Figura 12 [16].

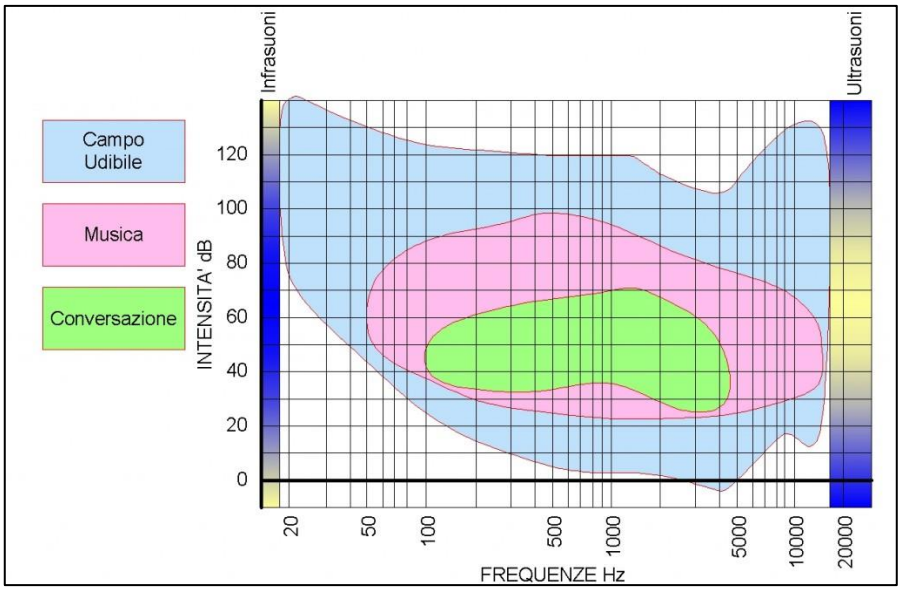


Figura 12 - Campo di variabilità in frequenza della voce umana

La direzionalità dell'oratore-sorgente, invece, è dovuta principalmente alla diffrazione causata dalla testa (per "diffrazione", in fisica, si intende il fenomeno associato alla deviazione della traiettoria di propagazione delle onde quando queste incontrano un ostacolo sul loro cammino). Questo fatto è più accentuato alle alte frequenze, in cui la lunghezza d'onda di emissione diventa paragonabile alle sue dimensioni.

A titolo informativo vengono riportate le definizioni, le relazioni fondamentali e i valori di riferimento per i parametri *SIL* e *SII*.

2.5. Lo Speech Interference Level (*SIL*)

L'applicazione del metodo SIL è limitata alla comunicazione diretta fra parlatore e ascoltatore senza l'utilizzo di sistemi elettronici di amplificazione, in ambienti rumorosi con minima riverberazione (UNI EN ISO 9921:2004 [8]). Questo metodo dovrebbe essere utilizzato solo quando altri metodi risultano applicabili.

Il livello di interferenza sul parlato *SIL* si ottiene, in dB, dalla relazione:

$$SIL = L_{S,A,L} - L_{SIL} \tag{23}$$

dove:

$L_{S,A,L}$ è il livello continuo equivalente ponderato A del parlato agli orecchi dell'ascoltatore, determinato a partire dallo sforzo vocale del parlatore $L_{S,A,1m}$, con correzione causata dall'effetto di elevato sforzo vocale, dall'utilizzo di dispositivi di protezione dell'udito, dalla distanza fra parlatore e ascoltatore e dalla presenza di parlatori e/o ascoltatori non madrelingua

L_{SIL} è il livello di interferenza sul parlato del rumore agli orecchi dell'ascoltatore, ottenuto dalla media aritmetica dei livelli di pressione sonora del rumore di fondo nelle quattro bande d'ottava con frequenza di centro banda 500, 1000, 2000 e 4000 Hz.

La Figura 13 mostra le scale soggettive di intelligibilità tramite le quali viene valutato l'indice *SIL*.

Classe di qualità della comunicazione	Valore dell'indice *SIL* (dB)
Pessima	< 3
Scadente	$3 - 10$
Discreta	$10 - 15$
Buona	$15 - 21$
Eccellente	> 21

Figura 13 - Classificazione della qualità della comunicazione in relazione all'indice *SIL*

2.6. Lo Speech Intelligibililty Index (*SII*)

Lo *Speech Intelligibilty Index SII* si applica per stimare l'intelligibilità nel caso di sistemi di comunicazione lineare anche quando l'ascolto, monoaurale o binaurale che sia, attraversa un canale di trasmissione lineare (come i microtelefoni) oppure sistemi di attenuazione lineare (cioè i dispositivi di protezione dell'udito).

L'indice viene calcolato partendo dalla determinazione dei livelli spettrali equivalenti del parlato e del rumore, a cui seguono valutazioni sugli effetti di mascheramento del rumore sul parlato. Dalla differenza dei due livelli normalizzata, si ottiene lo SII – variabile fra 0 e 1 - come somma pesata dei contributi delle diverse bande di frequenza sull'intelligibilità complessiva.

Per il calcolo del SII sono possibili quattro metodi che si riferiscono a diverse bande di frequenza, ma non verranno trattati perché non interessanti ai fini di questa trattazione. Si ritiene soddisfacente l'intelligibilità di una comunicazione se $SII > 75$, per $SII < 45$ si ha un'intelligibilità insufficiente.

2.7. Lo Speech Transmission Index (*STI*)

L'Indice di trasmissione del parlato *STI* è una grandezza che esprime la qualità della trasmissione del parlato in termini di intelligibilità, in relazione ad un percorso acustico o elettro-acustico tra parlatore ed ascoltatore. Con lo *STI* l'intelligibilità può essere prevista per diversi tipi di frasi o parole, ed inoltre sono stabiliti valori minimi per una vasta serie di percorsi di trasmissione del parlato o applicazioni tipiche.

Come già esposto in precedenza, all'origine dell'indice c'è il concetto secondo il quale nell'inviluppo dell'intensità del parlato le fluttuazioni temporali (dette modulazioni) derivano dalla separazione acustica di fonemi, parole e frasi. Le fluttuazioni lente corrispondono alle parole e alle frasi, le fluttuazioni veloci ai singoli fonemi contenuti nelle parole. Nel parlato "chiaro" le frequenze si muovono da 0,5 a 16 Hz, con modulazione massima a circa 3 Hz.

La conservazione dell'inviluppo dell'intensità fra parlatore ed ascoltatore risulta fondamentale ai fini di ottenere un'intelligibilità elevata. Infatti, il deterioramento dell'inviluppo corrisponde alla riduzione della profondità di modulazione per uno o più frequenze di modulazione. Lo *STI* quantifica il livello di questo deterioramento per causa di distorsioni come il rumore di fondo, la riverberazione e l'eco, tramite la funzione di trasferimento della modulazione *MTF*, di cui è già stata riportata la definizione.

La Figura 14 rappresenta il concetto di riduzione della modulazione dovuto al canale di trasmissione.

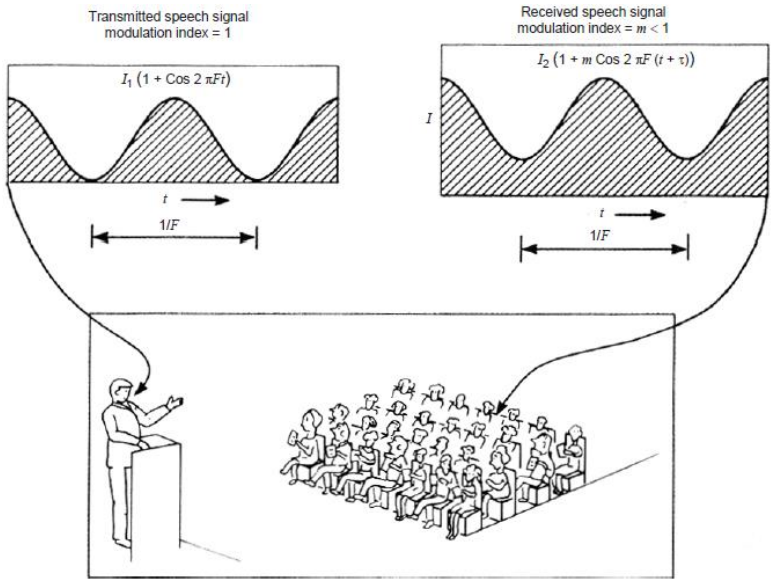


Figura 14 - Concetto di riduzione in modulazione dovuto al canale di trasmissione

2.8. Metodi per la determinazione dello *STI*

Esistono due metodi per arrivare alla determinazione dello *STI*: il metodo diretto e il metodo indiretto.

2.8.1. Il metodo diretto

Lo *STI* può essere misurato direttamente utilizzando un opportuno segnale modulato o indirettamente tramite strumenti matematici di un sistema di risposta all'impulso usando la relazione proposta da Schroeder.

La misurazione *full STI*, cioè quella basata sul segnale di prova completo, comprende 7 segnali di rumore rosa portanti, uno per ogni banda d'ottava nell'intervallo che va dai 125 agli 8000 Hz, modulati sinusoidalmente in intensità con 14 frequenze di modulazione, ad intervalli di un terzo d'ottava da 0,63 a 12,5 Hz ed alla massima profondità di modulazione possibile. Si ottiene così un totale di 98 segnali di prova indipendenti della durata di circa 10 secondi l'uno. Il livello in ogni banda d'ottava corrisponde allo spettro del parlato continuo a lungo termine.

La funzione di trasferimento della modulazione per ogni banda d'ottava rappresenta il fattore di riduzione della profondità di modulazione fra il segnale ricevuto e quello trasmesso in funzione della frequenza di modulazione.

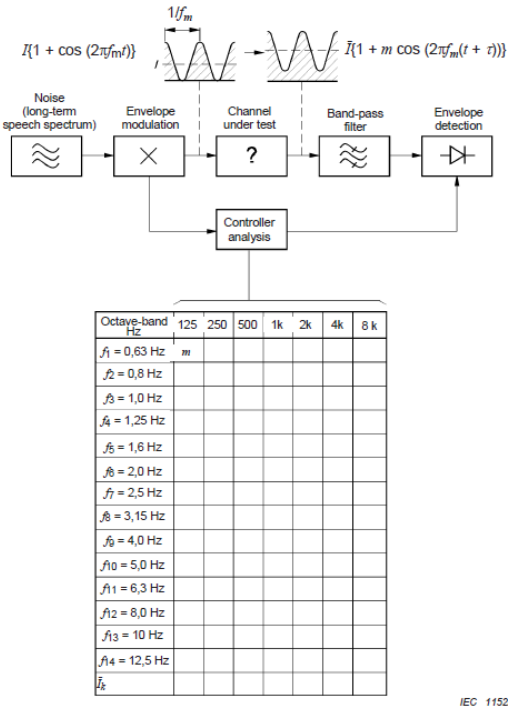


Figura 15 - Il valore della funzione di trasferimento della modulazione *m* viene determinato per ogni cella della matrice composta dalle 7 bande d'ottava e dalle 14 frequenze di modulazione. Inoltre, i livelli d'intensità d'ottava $\bar{I}_k$ (pari al quadrato dei livelli di pressione sonora) vengono ricavati dal calcolo degli effetti di mascheramento uditivo

Dai 14 valori del fattore di riduzione della profondità di modulazione per ogni banda d'ottava è calcolato un indice di trasmissione del parlato. Lo *STI*, compreso fra 0 e 1, si fonda sui contributi ponderati relativi alle 7 bande d'ottava. I fattori relativi al genere maschile e femminile sono espressi in differenti spettri del segnale di prova e differenti fattori di ponderazione (generalmente viene più usato il parlato maschile perché risultante meno intellegibile di quello femminile).

Per un fattore di tempo, la misurazione con la procedura *full STI* è impraticabile in molte situazioni. Per questo sono stati sviluppati altri metodi di misura più veloci, come lo *Speech Transmission Index for Public Address systems* (*STIPA*), lo *Speech Transmission Index for TELecommunication systems* (*STITEL*) ed il *Rapid Speech Transmission Index* (*RASTI*).

2.8.1.1. Lo Speech Transmission Index for Public Addres (*STIPA*)

Lo *STIPA* è il metodo preferibile per valutare l'intelligibilità nella maggior parte delle applicazioni, con o senza i sistemi di allarme vocale ed i sistemi sonori di distribuzione. È una procedura semplificata rispetto a quella dello *STI*, ma comunque ancora sensibile alle distorsioni acustiche dell'ambiente e/o alle distorsioni più frequenti del sistema di comunicazione. La misura richiede l'emissione di un rumore rosa (v. infra paragrafo 3.4.3.1) filtrato per le 7 bande d'ottava che vanno dai 125 agli 8000 Hz, con lo spettro della voce maschile media e, per ciascuna banda d'ottava, la modulazione sinusoidale simultanea con due frequenze di modulazione. L'uscita delle 7 bande d'ottava viene sommata per generare un unico segnale a banda larga.

La misura del metodo *STIPA* dura 15 o 20 secondi circa, e va ricordato che è valida solo con voce maschile, oltre che la natura della sua procedura semplificata limita la possibilità di tenere conto di alcune forme di distorsione non lineare.

La Figura 16 mostra i valori delle 2 x 7 = 14 frequenze di modulazione per il metodo *STIPA*.

Octave band Hz	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
First modulation frequency Hz	1,60	1,00	0,63	2,00	1,25	0,80	2,50
Second modulation frequency Hz	8,00	5,00	3,15	10,0	6,25	4,00	12,5

Figura 16 - Frequenze di modulazione per il metodo *STIPA*

2.8.1.2. Lo Speech Transmission Index for TELecommunication (*STITEL*)

Il metodo *STITEL* consiste in un unico segnale di test formato da 7 frequenze di modulazione, una per banda d'ottava, generate simultaneamente.

La misura di questo metodo dura circa 12 secondi, e non dovrebbe essere usato per canali di trasmissione.

La Figura 17 mostra i valori delle 7 frequenze di modulazione per il metodo *STITEL*.

Octave band Hz	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
Modulation frequency Hz	1,12	11,33	0,71	2,83	6,97	1,78	4,53

Figura 17 - Frequenze di modulazione per il metodo *STITEL*

2.8.1.3. Il Rapid Speech Transmission (*RASTI*)

Il metodo *RASTI* viene considerato ormai obsoleto dalla normativa stessa. In ogni caso, prevede 5 frequenze di modulazione per le bande d'ottava a 500 e 2000 Hz, per un totale di quindi 10 frequenze di modulazione, come riportato in Figura 18.

Modulation frequency Hz	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
500 Hz octave band	1,0	2,0	4,0	8,0	–
2 000 Hz octave band	0,7	1,4	2,8	5,6	11,2

Figura 18 - Frequenze di modulazione per il metodo *RASTI*

2.8.2. Il metodo indiretto

Il metodo indiretto, applicabile solamente nei casi di sistemi di trasmissione lineari e tempo invarianti, prevede la misurazione della risposta all'impulso relativa al percorso di trasmissione, in assenza di rumore, e del rapporto segnale/rumore.

Il fattore di riduzione della profondità di modulazione $m_{f,F}$ alla frequenza di modulazione F nella banda d'ottava f, si ottiene con la relazione di Schroeder (già nominata sopra):

$$m_{f,F} = \frac{\left| \int_0^{\infty} e^{-j2\pi Ft} p_f^2(t)\,dt \right|}{\int_0^{\infty} p_f^2(t)\,dt} \cdot \frac{1}{\left(1+10^{\left(-(S/N)_f/10\right)}\right)} \qquad (24)$$

dove:

$p(t)$ è la risposta all'impulso per il percorso sorgente-ricevitore nella banda d'ottava f;

S/N_f è il rapporto segnale/rumore, cioè la differenza fra il livello del segnale (cioè del parlato) e quello del rumore nella posizione dell'ascoltatore, per la banda d'ottava considerata, in dB.

Il numeratore del primo termine dell'equazione è il modulo della trasformata di Fourier del quadrato della risposta all'impulso, il denominatore è l'energia totale della risposta all'impulso.

La norma BS EN 60268-16:2011 [4] propone 3 diversi metodi di calcolo dei fattori di riduzione della modulazione, in base agli strumenti disponibili e al contesto.

2.8.2.1. Metodo di calcolo A – Risposta all'impulso segnale/rumore

In fase di progetto, è possibile determinare la risposta all'impulso nei diversi punti di una sala tramite software di simulazione. Così facendo è possibile modificare la forma ed i materiali dell'ambiente al fine di ottimizzare l'intelligibilità del parlato applicando la relazione di Schroeder (24).

2.8.2.2. Metodo di calcolo B – Campo riverberato diffuso con contributo del suono diretto trascurabile

Assumendo l'ipotesi di campo riverberato perfettamente diffuso e disgregando il contributo del suono diretto, vale a dire considerando il ricevitore ad una distanza molto oltre la distanza critica (almeno 5 volte), i 98 valori di fattore di riduzione della profondità di modulazione $m_{f,F}$ si determinano con la relazione:

$$m_{f,F} = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{2\pi \cdot F \cdot T_f}{13{,}8}\right)^2}} \cdot \frac{1}{1+10^{\frac{\left(-(L_{sr,f}-L_{n,f})\right)}{10}}} \qquad (25)$$

dove:

T_f è il tempo di riverberazione [s];

L_{srf} è il livello del parlato nel campo riverberato [dB];

$L_{n,f}$ è il livello di rumore ambedue nella posizione dell'ascoltatore [dB].

Si ricorda, ancora, che la funzione di trasferimento della modulazione quantifica il livello delle riduzioni nelle modulazioni del materiale originario mediante una funzione della modulazione di frequenza. Le modulazioni sono definite dall'inviluppo della intensità del segnale, in quanto è nel dominio dell'intensità che il rumore o il riverbero di interferenza può compromettere la profondità di modulazione di una modulazione sinusoidale senza cambiare forma.

La Figura 19 raffigura questo concetto per la banda d'ottava centrata nei 250 Hz per due semplici sistemi di trasmissione, uno con la sola riverberazione presente (caso A: $T = 2{,}5$ s), l'altro con solo rumore di interferenza (caso B: rapporto segnale/rumore nullo).

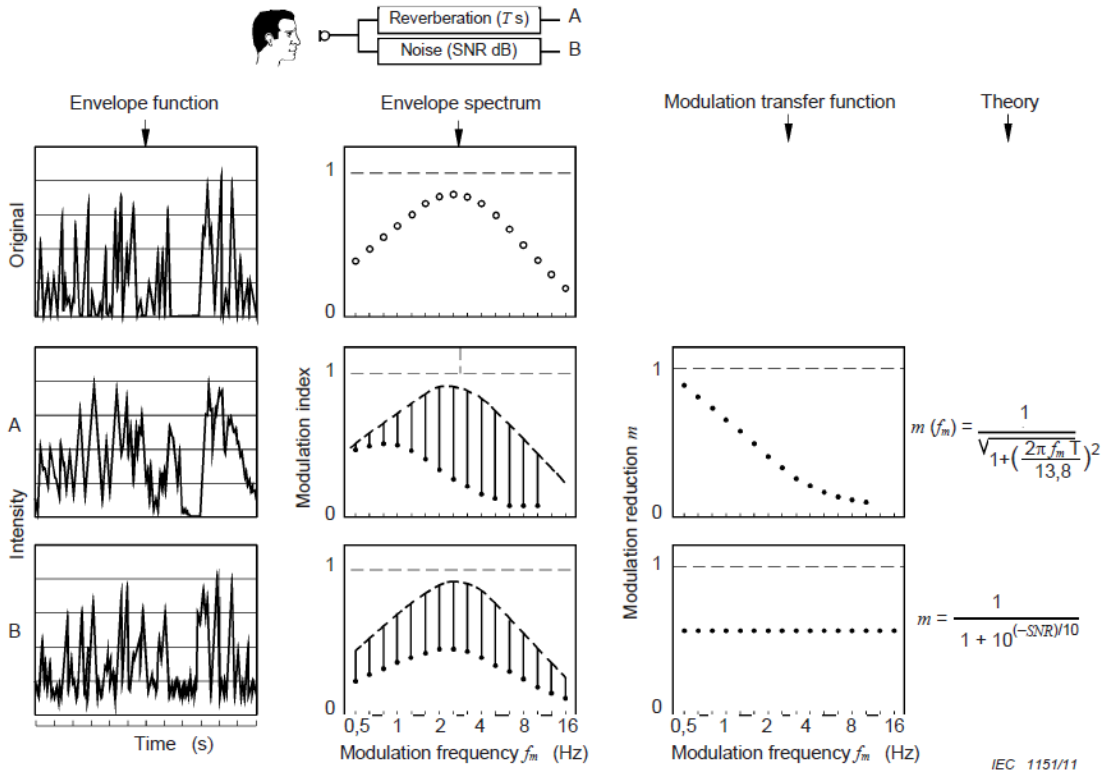


Figura 19 - Rappresentazione teorica della *MTF*

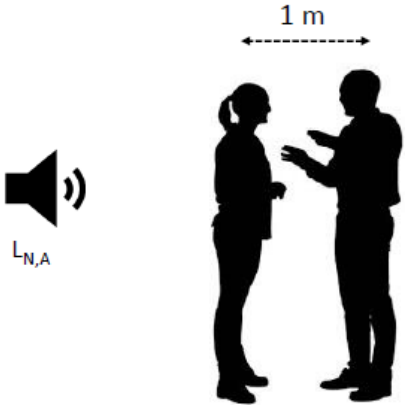
Il livello del parlato nel campo riverberato $L_{n,f}$ è ricavato dalla relazione:

$$L_{sr,f} = L_{s,1m,f} - ID_f - 10 \cdot \log r_{c,f}^2 \qquad (26)$$

dove:

$L_{s,1m,f}$ è il livello del parlato ad un metro dalla bocca del parlatore in campo libero [dB].

Nella Figura 20 sono riportati i livelli di pressione sonora ponderati A ad 1 metro dalla bocca di un parlatore $L_{s,A,1m}$ e i corrispondenti sforzi vocali.



$$L_{S,A,1m} = 55 + c\left(L_{N,A} - 45\right) \text{ [dB(A)]} \qquad (27)$$

Sforzo vocale	$L_{s,A,1m}$ (dBA)
Rilassato	54
Normale	60
Elevato	66
Forte	72
Molto forte	78

Figura 20 - Sforzo vocale di un parlatore di sesso maschile e relativi livelli sonori ponderati A, ad 1 m di fronte alla bocca

Lo spettro del parlato si ottiene dalla Figura 21, separatamente stavolta per il genere maschile e femminile, dove i livelli nelle bande d'ottava $L_{s,1m,f}$ sono normalizzati ad un livello globale ponderato A di 0 dB.

Sesso del parlatore	Frequenza centrale delle bande di ottava (Hz)							Livello ponderato A
	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000	
Maschio	2,9	2,9	-0,8	-6,8	-12,8	-18,8	-24,8	0,0
Femmina	-	5,3	-1,9	-9,1	-15,8	-16,7	-18,0	0,0

Figura 21 - Livelli di pressione sonora del parlato in banda d'ottava, ad 1 m dalla bocca del parlatore $L_{s,f,1m}$ relativi al livello globale ponderato A $L_{s,A,1m}$

Lo sforzo vocale è influenzato dal rumore di fondo, come rappresentato Figura 22, dove viene riportata la relazione – conosciuta come *effetto Lombard* – tra sforzo vocale e livello di rumore di fondo $L_{n,A,s}$, espresso come livello globale ponderato A. L'area tratteggiata rappresenta la variabilità dell'*effetto Lombard* fra diversi parlatori.

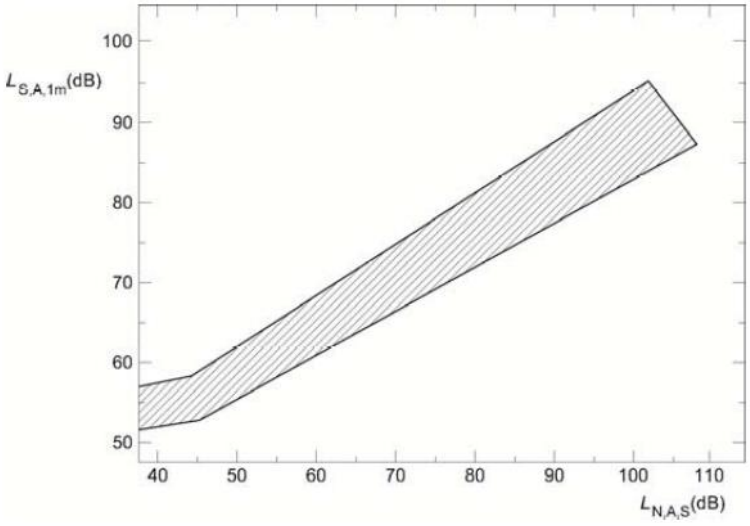


Figura 22 - Relazione fra lo sforzo vocale $L_{S,A,1m}$ e il livello del rumore di fondo nella posizione del parlatore $L_{N,A,S}$

La qualità del parlato con alti sforzi vocali, superiori a $L_{s,A,1m}$ = 75 dB(A), si riduce in maniera sostanziale, rendendo difficile la comprensione rispetto a sforzi vocali più bassi. Si può tenere conto di questo attraverso la riduzione del livello del parlato nei calcoli con la condizione: se $L_{s,A,1m}$ > 75 dB(A) si riduce il $L_{s,A,1m}$ di un ΔL = 0,4 ($L_{s,A,1m}$ – 75) dB.

ID_f è l'indice di direttività [dB], ottenuto dalla relazione:

$$ID_f = 10 \log Q_f \tag{28}$$

dove:

Q_f è il fattore di direttività nella banda d'ottava considerata. Come riportato nella ANSI S3.5 [7], sull'asse di massima emissione, in corrispondenza degli angoli azimutale e di elevazione di 0°, è possibile assumere un indice di direttività ID_f variabile da 1 a 3 dB per valori di frequenza minori o uguali a 1000 Hz, da 2 a 5 dB per valori superiori.

In Figura 23 sono riportati i valori possibili di Q_f in funzione del campo sonoro.

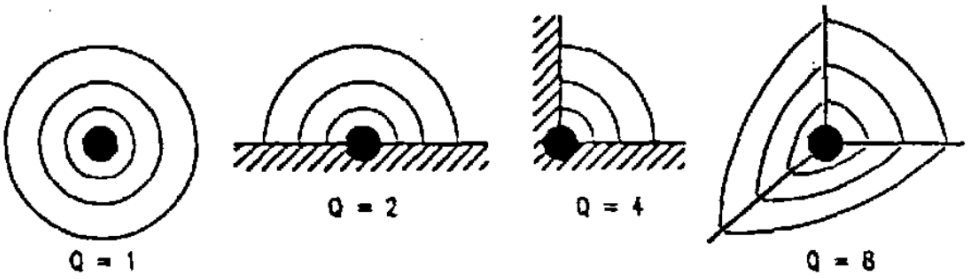


Figura 23 - Fattore di direttività in funzione della posizione della sorgente sonora all'interno dell'ambiente considerato

$r_{c,f}$ è la distanza critica [m] nella banda d'ottava f considerata, e viene calcolata con la seguente formula:

$$r_{c,f}^2 \approx 0{,}0032 \frac{V}{T_f} \tag{29}$$

dove:

V è il volume dell'ambiente [m^3];

T_f è sempre il tempo di riverberazione alla frequenza f considerata [s].

2.8.2.3. Metodo di calcolo C – Campo riverberato diffuso e contributo del suono diretto

Assumendo l'ipotesi di campo riverberante perfettamente diffuso e considerando il contributo del suono diretto, vale a dire considerando il ricevitore ad una distanza minore della distanza critica, i 98 valori di fattore di riduzione della profondità di modulazione $m_{f,F}$ si determinano con l'espressione:

$$m_{f,F} = \frac{\sqrt{A^2 + B^2}}{C} \tag{30}$$

con:

$$A = \frac{Q_f}{r^2} + \frac{1}{r_{c,f}^2} \cdot \left[1 + \left(\frac{2\pi F T_f}{13{,}8} \right)^2 \right]^{-1} \tag{31}$$

$$B = \frac{2\pi F T_f}{13{,}8 \cdot r_{c,f}^2} \cdot \left[1 + \left(\frac{2\pi F T_f}{13{,}8} \right)^2 \right]^{-1} \tag{32}$$

$$C = \frac{Q_f}{r^2} + \frac{1}{r_{c,f}^2} + Q_f \cdot 10^{(-L_{s,f} + L_{n,f})/10} \tag{33}$$

dove:

r è la distanza fra parlatore ed ascoltatore [m];

Q_r è il fattore di direttività del parlatore [adim];

$r_{c,f}$ è la distanza critica [m];

T_f è il tempo di riverberazione [s];

$L_{s,f}$ è il livello del parlato nella posizione dell'ascoltatore [dB];

$L_{n,f}$ è il livello del rumore nella posizione dell'ascoltatore [dB].

Il livello del parlato nella posizione dell'ascoltatore $L_{s,f}$ si ricava dall'espressione:

$$L_{S,f} = 10 \cdot \log\left(10^{\frac{L_{sd,f}}{10}} + 10^{\frac{L_{sr,f}}{10}}\right) \quad (34)$$

dove:

$L_{sd,f}$ è il livello del parlato nel campo diretto [dB];

$L_{sr,f}$ è il livello del parlato nel campo riverberato [dB].

Il livello del parlato nel campo diretto $L_{sd,f}$ si calcola con la relazione:

$$L_{sd,f} = L_{S,f,1m} - 20\log r \quad (35)$$

dove:

$L_{s,f,1m}$ è il livello di pressione sonora del parlato nel campo riverberato ad 1 m di distanza dalla bocca del parlatore, nella banda d'ottava considerata [dB];

r è la distanza fra parlatore ed ascoltatore [m].

2.8.2.4. Determinazione dello *STI*

La previsione della funzione di trasferimento della modulazione, assumendo le ipotesi sopra riportate, è accurata per ricevitori posti in asse col parlatore. La Figura 24 riporta l'applicabilità, le limitazioni ed i campi di applicazione dei vari metodi.

Application	Recommended test	FULL STI[a]	STIPA	STITEL	Limitations	Work-arounds
Assessing suitability of room acoustics for speech communication (no electronic amplification)	STIPA	++	++	+/−	Suitability of STITEL depends on reverberation	
Evaluating PA and VA systems	STIPA	+	++	+/−	Suitability of STITEL depends on reverberation and echoes	
Evaluating telecommunication channels (phone, radio)	STITEL	+	+	++	STITEL has more diagnostic power	
Channel features amplitude compression	STIPA	+	+	+		
Difference between male and female voices needs specific attention	FULL STI	++	−	+	STIPA not suitable for female (male spectrum only)	
Strong centre clipping	None	−	−	−		none
Strongly fluctuating noise	STIPA	+/−	+/−	+/−		Report several STI measurements
Speech and noise clearly spatially separated or a strong direct-field component exists in a highly reverberant environment	STI	+	+/−	+/−	To be used with caution. Currently standardised methods are inaccurate.	See 7.10
Channels that do not permit artificial test signals, such as vocoders	None	+/−	+/−	+/−	Currently standardised methods are inaccurate.	[b]Use a speech-based STI test signal or listener tests
++ very well suited method, + well suited method, +/− suitable method, − not a suitable method						

Figura 24 - Applicabilità del test

La differenza fra i metodi B e C risiede perciò nel fatto che vada considerato o meno il contributo del suono diretto. Una volta arrivati ai valori di fattore di riduzione della profondità di modulazione, la procedura per la determinazione dello *STI* è analoga. Ne viene adesso presentato l'algoritmo.

Come già detto, le prestazioni del percorso di trasmissione vengono quantificate mediante la determinazione della funzione di trasferimento della modulazione per le 7 bande d'ottava dai 125 agli 8 kHz, ottenendo 7 x 14 = 98 valori di fattore di riduzione della profondità di modulazione *m* per ogni posizione d'ascolto.

I valori di *m* vengono corretti per tenere conto degli effetti di mascheramento uditivo, vale a dire la riduzione della sensibilità uditiva dovuta ai suoni più forti nella banda contigua a più bassa frequenza, e della soglia assoluta di ricezione. Entrambi gli effetti sono considerati come un rumore immaginario che comporta un decremento del rapporto segnale/rumore effettivo, e quindi una riduzione della profondità di modulazione.

L'effetto del mascheramento uditivo è rappresentato con una linea retta la cui pendenza dipende dal livello di segnale nella banda d'ottava precedente, come mostrato in Figura 25.

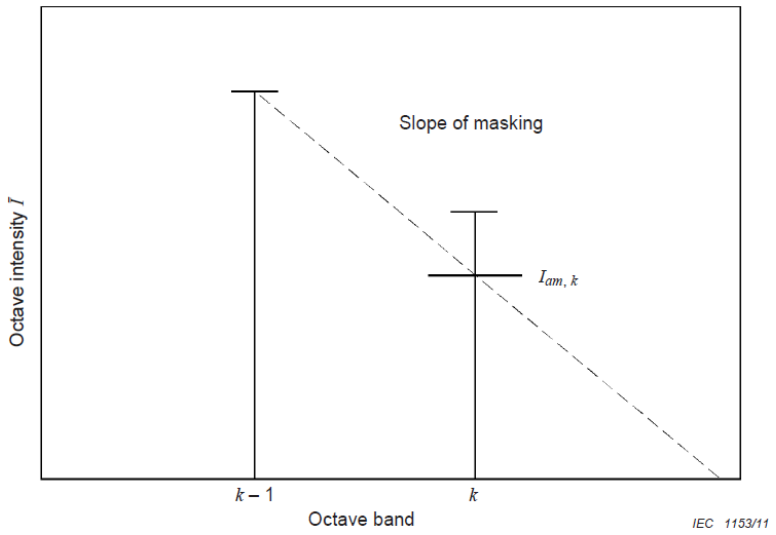


Figura 25 - Effetto di mascheramento uditivo nella banda d'ottava *f-1* sulla banda superiore *f*

L'intensità dovuta all'effetto del mascheramento uditivo nella banda d'ottava *f* si ottiene dalla seguente relazione:

$$I_{am,f} = I_{f-1} \cdot amf \tag{36}$$

dove:

I_{f-1} è l'intensità nella banda d'ottava precedente (banda d'ottava *f-1*);

amf è il fattore di mascheramento uditivo dipendente dall'intensità I_{f-1}.

L'intensità I_{f-1} per una banda d'ottava *f-1* è data da:

$$I_{f-1} = 10^{(L_{f-1}/10)} \tag{37}$$

dove:

L_{f-1} è il livello di pressione sonora nella banda *f-1* [dB]

Il fattore di mascheramento uditivo *amf* per la banda d'ottava *f* dipende dall'intensità della banda *f-1*, ed è dato dalla relazione:

$$amf = 10^{(amdB/10)} \tag{38}$$

dove:

amdB è il livello del mascheramento uditivo [dB] per la banda d'ottava *f* in funzione del livello di pressione sonora *L* [dB] nella banda d'ottava *f-1*; i suoi valori sono riportati nella Figura 26.

Livello nella banda d'ottava *f*-1 (dB)	<63	≥63 e <67	≥67 e <100	≥100
Mascheramento uditivo *amdB* (dB)	0,5 x L -65	1,8 x L - 146,9	0,5 x L - 59,8	-10

Figura 26 - Mascheramento uditivo in funzione del livello nella banda d'ottava precedente

Si fa notare che il livello di mascheramento uditivo è funzione del livello totale di pressione sonora in quella banda d'ottava, che comprende parlato e rumore ambientale.

Nonostante non sia riportato nella norma, si presume che l'intensità If per una banda d'ottava *f* sia data, analogamente alla relazione data per I_{f-1}, con:

$$I_f = 10^{(L_f/10)} \tag{39}$$

dove:

L_f è il livello di pressione sonora nella banda f [dB].

L'intensità della soglia assoluta di udibilità per una banda d'ottava f è data da:

$$I_{rs,f} = 10^{(L_{rs,f}/10)} \tag{40}$$

dove:

$L_{rs,f}$ è la soglia assoluta di udibilità [dB], intesa come intrinseco limite inferiore del livello inferiore del livello di rumore all'interno di ogni banda d'ottava che riduce il rapporto segnale/rumore effettivo quando i livelli del parlato sono bassi; nella Figura 27 sono riportati i suoi valori per ogni banda d'ottava.

		Frequenza centrale delle bande di ottava (Hz)						
		125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
Soglia assoluta di udibilità (dB)	$L_{rs,f}$	46	27	12	6,5	7,5	8	12

Figura 27 - Soglia dell'udibilità nelle bande d'ottava

I fattori di riduzione della modulazione $m_{f,F}$ vengono quindi corretti con la relazione:

$$m'_{f,F} = m_{f,F} \frac{I_f}{I_f + I_{am,f} + I_{rs,f}} \tag{41}$$

dove:

$m'_{f,F}$ è il fattore di riduzione della modulazione corretto;

I_f è l'intensità per la banda d'ottava f;

$I_{am,f}$ è l'intensità per l'effetto del mascheramento uditivo sulla banda d'ottava f;

$I_{rs,f}$ è l'intensità della soglia assoluta di udibilità.

Ciascuno dei 98 valori corretti viene convertito in un rapporto segnale/rumore effettivo $(S/N)_{eff,f,F}$ definito come quel rapporto segnale/rumore equivalente che da solo, cioè senza riverberazione, fornirebbe lo stesso valore di m:

$$\left(S/N\right)_{eff,f,F} = 10\log\left(\frac{m_{f,F}}{1-m_{f,F}}\right) \tag{42}$$

I rapporti segnale/rumore effettivi sono compresi nell'intervallo $-15 \leq (S/N)_{eff,f,F} \leq 15$: valori minori di -15 dB vengono assunti pari a -15, valori maggiori di +15 dB vengono assunti pari a 15.

Ogni rapporto segnale/rumore apparente è convertito in indice di trasmissione $T_{f,F}$ compreso fra 0 e 1:

$$TI_{f,F} = \frac{\left(S/N\right)_{eff,f,F} + 15}{30} \tag{43}$$

Viene calcolato l'indice di trasferimento della modulazione MTI_f per ogni banda d'ottava f, ottenuto dalla media aritmetica degli indici di trasmissione per le 14 frequenze di modulazione:

$$MTI_f = \frac{1}{14}\sum_{F=1}^{14} TI_{f,F} \tag{44}$$

Infine, dalla somma ponderata degli indici di trasferimento della modulazione per tutte le 7 bande d'ottava, si ottiene l'indice STI dalla relazione:

$$STI = \sum_{f=1}^{7} \alpha_f \times MTI_f - \sum_{f=1}^{6} \beta_f \times \sqrt{MTI_f \times MTI_{f+1}} \tag{45}$$

dove:

MTI_f è l'indice di trasferimento della modulazione per la banda d'ottava f;

α_f è il fattore di ponderazione per la banda d'ottava *f*;

β_f è il fattore di ridondanza tra la banda d'ottava f e la banda d'ottava *f+1*.

I valori dei due fattori α_f e β_f sono riportati in Figura 28.

Sesso del parlatore		Frequenza centrale delle bande di ottava (Hz)						
		125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
Maschio	α	0,085	0,127	0,230	0,233	0,309	0,224	0,173
	β	0,085	0,078	0,065	0,011	0,047	0,095	-
Femmina	α	-	0,117	0,223	0,216	0,328	0,250	0,194
	β	-	0,099	0,066	0,062	0,025	0,076	-

Figura 28 - Fattori di ponderazione α_f e di ridondanza β_f per la determinazione dell'indice *STI* nei casi di voce maschile e femminile

I fattori α_f rappresentano il contributo relativo di ogni banda d'ottava allo *STI*.

I fattori β_f rappresentano la frazione di sovrapposizione dell'informazione tra due bande d'ottava adiacenti rispetto all'intelligibilità del parlato. In pratica, bande d'ottava adiacenti contengono informazione ridondante per l'intelligibilità del parlato e, se una banda non contribuisce all'intelligibilità (perché mascherata dal rumore o dalla riverberazione), allora la banda adiacente po' in parte compensare per questo contributo mancante.

I valori dell'indice *STI* sono correlati a scale soggettive di qualità della comunicazione, riportate in Figura 29.

Classe di qualità della comunicazione	Valore dell'indice *STI*
Pessima	$< 0,30$
Scadente	0,30 – 0,45
Discreta	0,45 – 0,60
Buona	0,60 – 0,75
Eccellente	$> 0,75$

Figura 29 - Classificazione della qualità della comunicazione in relazione all'indice *STI*

Nel caso risultino valori maggiori di 1, questi vanno riportati comunque ad 1.

Come criterio generale, un incremento di *STI* di 0,1 corrisponde a 3 dB di incremento di rapporto segnale/rumore.

In Appendice F (informativa) è riportata anche una classificazione della qualità di intellegibilità in funzione del valore assunto dall'indice *STI* (Figura 30).

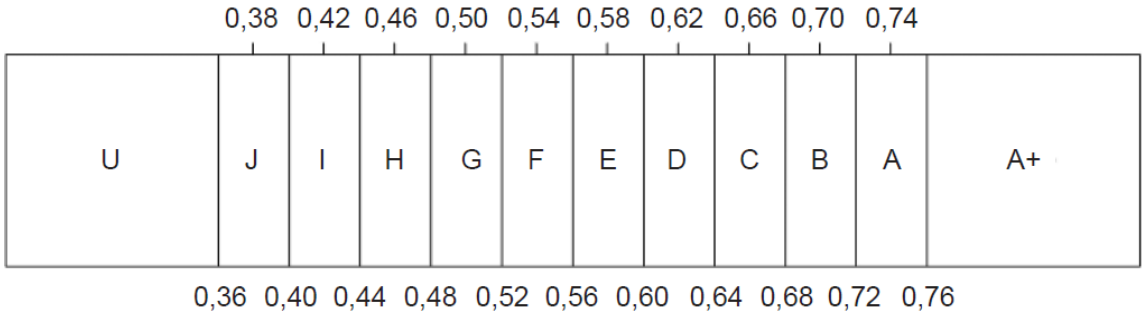


Figura 30 - Classificazione dettagliata dello *STI*

L'Appendice G (informativa), correla la classificazione precedente con delle informazioni utili anche ai fini progettuali, indicando in funzione dell'uso di un determinato ambiente o impianto elettroacustico e della tipologia dei messaggi riprodotti (messaggi semplici con parole familiari e comuni, messaggi complessi con parole non familiari, etc.) la classe ottimale per permettere un adeguata intellegibilità dei messaggi (Figura 31).

Category	Nominal STI value	Type of message information	Examples of typical uses (for natural or reproduced voice)	Comment
A+	>0,76		Recording studios	Excellent intelligibility but rarely achievable in most environments
A	0,74	Complex messages, unfamiliar words	Theatres, speech auditoria, parliaments, courts, Assistive Hearing Systems (AHS)	High speech intelligibility
B	0,7	Complex messages, unfamiliar words		
C	0,66	Complex messages, unfamiliar words	Theatres, speech auditoria, teleconferencing, parliaments, courts	High speech intelligibility
D	0,62	Complex messages, familiar words	Lecture theatres, classrooms, concert halls	Good speech intelligibility
E	0,58	Complex messages, familiar context	Concert halls, modern churches	High quality PA systems
F	0,54	Complex messages, familiar context	PA systems in shopping malls, public buildings' offices, VA systems, cathedrals	Good quality PA systems
G	0,5	Complex messages, familiar context	Shopping malls, public buildings' offices, VA systems	Target value for VA systems
H	0,46	Simple messages, familiar words	VA and PA systems in difficult acoustic environments	Normal lower limit for VA systems
I	0,42	Simple messages, familiar context	VA and PA systems in very difficult spaces	
J	0,38		Not suitable for PA systems	
U	<0,36		Not suitable for PA systems	

Figura 31 - Esempi di classificazione dello *STI* in funzione di tipiche destinazioni d'uso

In generale, se confrontata con l'intelligibilità ottenuta per un ascoltatore madrelingua, quelli non madrelingua richiedono dai 4 ai 5 dB in più di rapporto senale/rumore per raggiungere pari condizioni di intelligibilità, come specificato in Figura 32, presente nell'Appendice H (informativa).

STI label range	Standard STI	Non-native category I experienced, daily second language use	Non-native category II intermediate experience and level of second language use	Non-native category III new learner, infrequent second language use
bad – poor	0,30	0,33	0,38	0,44
poor – fair	0,45	0,50	0,60	0,74
fair – good	0,60	0,68	0,86	impossible
good – excellent	0,75	0,86	impossible	impossible

Figura 32 - Classificazione dell'intelligibilità regolata per uditori non madrelingua

3. Gli uffici *open-space*

3.1. Caratteristiche degli ambienti

Concepiti in origine per il lavoro di gruppo, gli *open-space* sono adesso utilizzati per ogni tipologia di lavoro d'ufficio, da quello routinario a quello che richiede concentrazione e risorse cognitive.

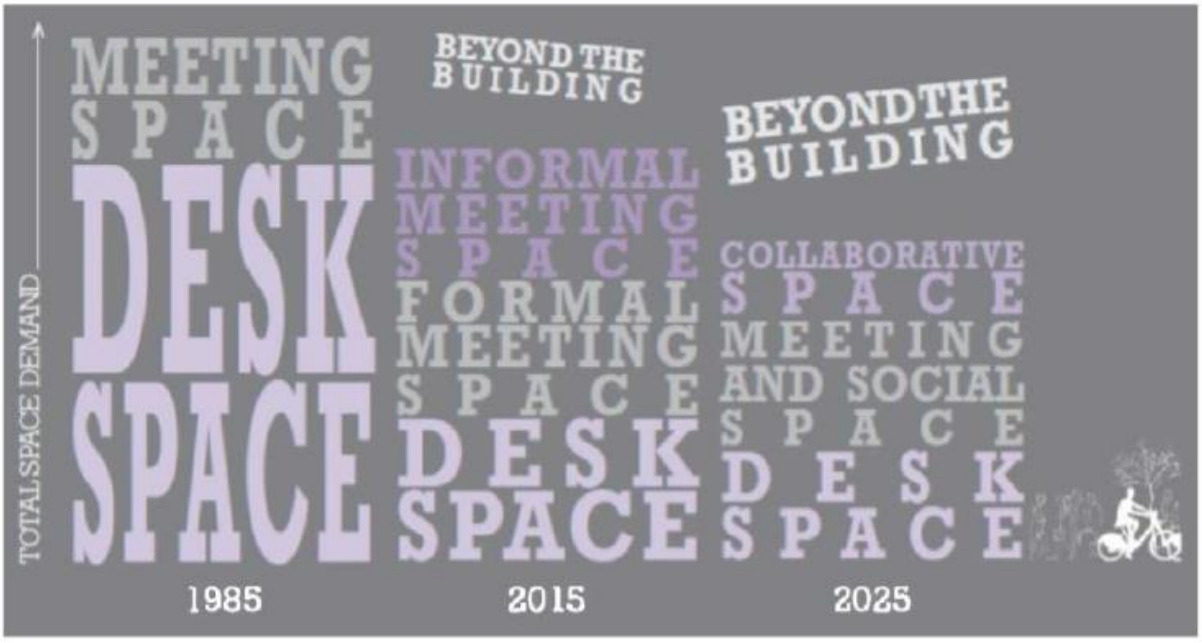


Figura 33 - Evoluzione della richiesta di spazi a Londra negli ultimi 50 anni

In questi ambienti, l'impiego di postazioni di lavoro aperte e modulari (dette "cubicoli") da un lato garantisce una maggiore flessibilità spaziale interna e riduce al minimo lo spreco di spazio, ma dall'altro, l'aumento della densità delle postazioni di lavoro, determina l'incremento del rumore di fondo per lo più dovuto al parlato, che porta ad una maggiore distrazione degli occupanti e ad una loro minore efficienza.

Il rumore degli uffici *open-space* non è solo dovuto al parlato; possono essere presenti, infatti. anche altri tipi di sorgenti, come le suonerie dei telefoni, il calpestio, gli impianti, il traffico esterno, le macchine da ufficio, ecc.

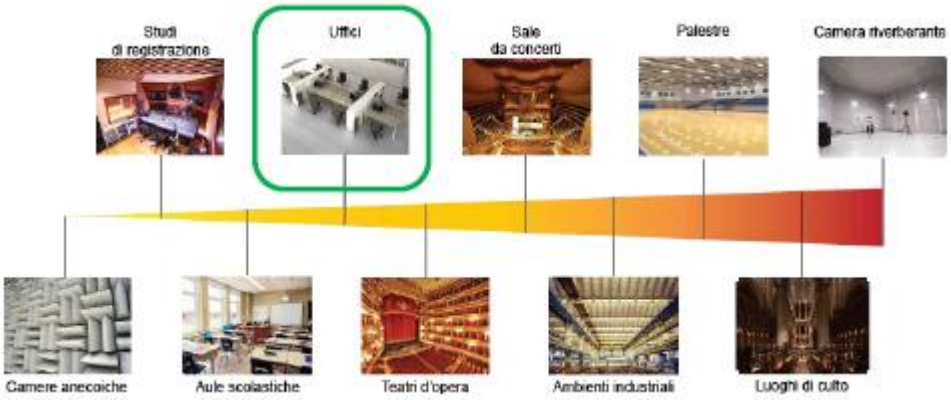


Figura 34 - Acustica degli ambienti chiusi: uffici

In generale, il parlato è la sorgente sonora più intensa, disturbante e sempre presente, mentre la presenza o meno di altre sorgenti dipende dal progetto architettonico e dalle abitudini degli occupanti, oltre che dal contesto esterno.

Il parlato è senz'altro necessario durante gran parte dell'attività lavorativa e in special modo durante il lavoro di gruppo, dove sono richieste interazioni, ma nel caso di mansioni per cui è richiesta una certa concentrazione o confidenzialità è auspicabile una bassa intelligibilità della parola tra postazioni adiacenti, cioè un'elevata *privacy* nella comunicazione.

Il progetto acustico di un *open-space* mira dunque a garantire privacy acustica e a prevenire distrazioni dovute al rumore; allo stesso tempo, però, anche a rendere possibile brevi comunicazioni fra lavoratori vicini. Tutto questo al fine di aumentare la produttività degli occupanti, oltre che la qualità del tempo trascorso al lavoro.

Un'attenta progettazione prevede la cura del layout dell'ufficio a partire dalle dimensioni dell'ambiente e della postazione, dall'altezza delle partizioni (o schermi) tra le postazioni, dalla distanza fra le postazioni, dall'assorbimento acustico dei materiali scelti, dall'inserimento di rumore mascherante.

Questi aspetti vengono applicati specificando i requisiti acustici relativi agli *open-space* che influiscono sul livello di prestazione degli occupanti (come lo *Speech Transmission Index* e lo *Speech Intelligibility Index*).

3.2. I requisiti acustici per elevate prestazioni degli uffici *open-space*

La norma francese NF S 31-080:2006 indica alcuni criteri per ottenere un livello di prestazione “efficiente” e “altamente efficiente” negli uffici *open-space*.

Nel primo caso, si tratta di *open-space* idonei per compiti che richiedono un limitato livello di concentrazione: l’ambiente acustico alla propria postazione è determinato dalle attività nelle postazioni di lavoro adiacenti e dai movimenti o attività negli spazi di circolazione; il livello di privacy nella conversazione è limitato, brevi conversazioni a bassa voce non disturbano gli occupanti, il rumore esterno degli impianti contribuisce a creare un moderato rumore di fondo, il rumore da calpestio è appena percepito.

Nel secondo caso, si tratta di *open-space* appropriati per compiti che richiedono un moderato livello di concentrazione, con momenti di intensa concentrazione: l’ambiente acustico della propria postazione di lavoro è caratterizzato dalle attività eseguite nelle immediate vicinanze, con un buon livello di privacy tra le postazioni più distanti, sono possibili conversazioni a bassa voce tra postazioni adiacenti, il rumore esterno e degli impianti non determina disturbo o affaticamento per gli occupanti.

Vengono indicati requisiti in merito a: livello di rumore di fondo, livello di rumore esterno e degli impianti, isolamento acustico di facciata e fra ambienti, livello di rumore da calpestio, tempo di riverberazione e attenuazione spaziale dei livelli di pressione sonora (Tabella 2).

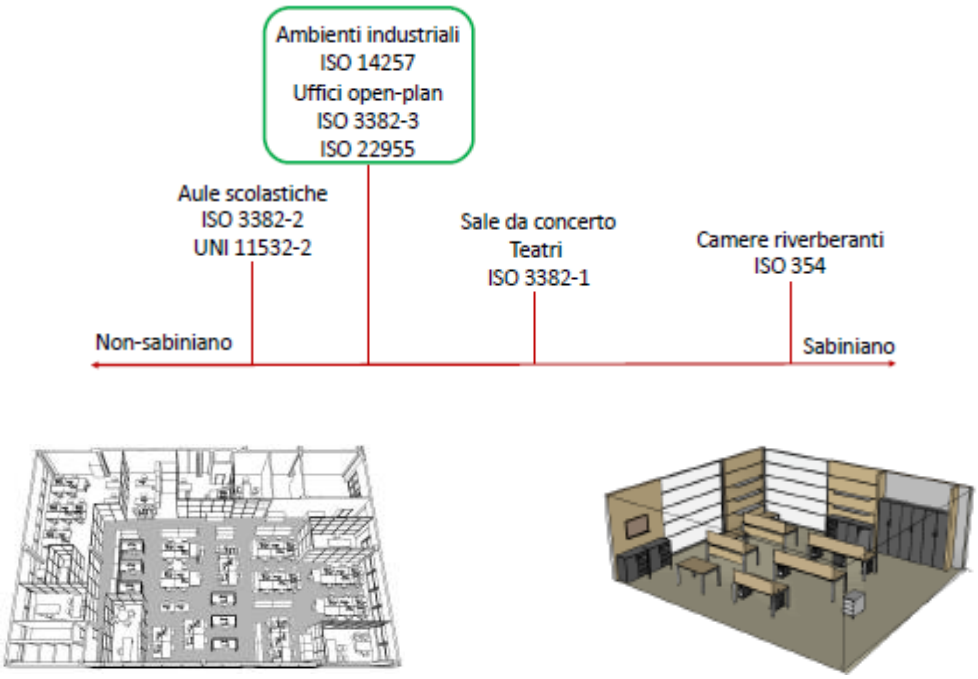


Figura 35 - Uffici open-space nella scala degli ambienti sabiniani e non: normative di riferimento

In particolare, la privacy acustica fra le varie postazioni si valuta tramite l'*Indice di attenuazione spaziale dei livelli di pressione sonora al raddoppio della distanza* DL_2 che rappresenta la pendenza in dB per il raddoppio della distanza dalla sorgente della curva di decadimento del suono nello spazio (UNI EN ISO 14257:2004).

Descrittore	Livello di prestazione "efficiente"	Livello di prestazione "altamente efficiente"
Livello di pressione sonora del rumore di fondo dovuto a:	$40 < L_{50} < 45$ dB(A)[a]	$40 \leq L_{50} \leq 45$ dB(A)
Rumore esterno	$D_{nT,A,tr}$[b] ≥ 30 dB $L_{50} \leq 35$ dB(A)	$D_{nT,A,tr}$[b] ≥ 30 dB $L_{50} \leq 30$ dB(A)
Rumore degli impianti	NR[c] $35 \leq L_p \leq NR\ 40$	$L_p \leq$ NR 33 (continuo) $L_{max} \leq 35$ dB(A) (discontinuo)
Rumore di impatto	$L'_{nT,w} \leq 60$ dB	$L'_{nT,w} \leq 58$ dB
Riverberazione ($V < 250$ m^3)	$0,6 < T_R < 0,8$ s	$T_R \leq 0,6$ s
Indice di attenuazione spaziale del livello di pressione sonora al raddoppio della distanza dalla sorgente ($V > 250$ m^3)	$DL_2 \geq 3$ dB Se DL_2 non è applicabile[d]: $T_R \leq 1$ s	$DL_2 \geq 4$ dB Se DL_2 non è applicabile[d]: $T_R \leq 0,8$ s
Isolamento acustico fra ambienti interni	$D_{nT,A}$[e] ≥ 35 dB	$D_{nT,A}$[a] ≥ 40 dB

[a] Livello percentile 50 ponderato A rilevato durante la durata della misurazione basato su livelli sonori equivalenti L_{Aeq} della durata di 1 s.

[b] $D_{nT,A,tr} = D_{nT,w} + C_{tr}$, dove $D_{nT,w}$ è l'indice di valutazione dell'isolamento acustico normalizzato rispetto al tempo di riverberazione e C_{tr} è il termine di adattamento allo spettro calcolato con lo spettro sonoro relativo al rumore di traffico urbano ponderato A (UNI EN ISO 140-4:2000, UNI EN ISO 717-1:2013)

[c] Curve di valutazione *NR* (*Noise Rating*) che specificano, in bande di ottava da 63 Hz a 8 kHz, un valore di soglia di pressione sonora corrispondente ad un limite di accettabilità del rumore ambientale interno (BS 8233:1999)

[d] Il caso in cui DL_2 non sia applicabile è riferito a problematiche inerenti le distanze dalle superficie riflettenti

[e] $D_{nT,A,tr} = D_{nT,w} + C$, dove C è il termine di adattamento allo spettro calcolato con lo spettro sonoro relativo al rumore rosa (UNI EN ISO 717-1:2013). Da valutarsi per pareti di separazione con o senza porte. Nel caso di isolamento acustico verso spazi di circolazione, i valori sono ridotti di 5 dB. Nel caso di uffici che richiedono una buona privacy in relazione agli spazi di circolazione, il valore di riferimento è superiore a 48 dB.

Tabella 2 - Requisiti acustici per uffici *open-space* in relazione al livello di prestazione degli occupanti nello svolgere il lavoro

3.3. Categorie ISO 2295:2020

Già introdotta nel paragrafo precedente, la norma ISO 2295 del 2020, pubblicata nel maggio 2021, suddivide le tipologie di spazi in 6 categorie, descrivendone le attività lavorative, le caratteristiche acustiche, le "sfide" progettuali ed indicandone parametri e valori di riferimento.

Figura 36 - Schematizzazione delle varie attività lavorative

Spazio di tipologia 1: attività non ancora conosciuta – pavimentazione libera

Descrizione dell'attività lavorativa:

- Attività non ancora definita con precisione;
- Caso in cui la proprietà sta costruendo spazi per uffici senza un cliente ben definito.

Caratteristiche acustiche dello spazio:

- Qualsiasi allestimento futuro;
- La build di base richiede quindi flessibilità adeguata per soddisfare una vasta gamma di requisiti e di allestimento;
- Riscontro sull'attratta commerciale e sull'impatto che avrà sul mercato immobiliare
- Sfide acustiche, parametri e valori:
- Sviluppato un nuovo spazio per essere successivamente suddiviso e arredato a seconda dell'utente finale;
- Lo scopo è quello di creare condizioni adeguate per una successiva pianificazione dell'ufficio;
- Rumore esterno e degli impianti adeguatamente controllato.

Acoustic challenges	Description, criterion	Target values	Required values
Minimising effect of many simultaneous sources Preventing "Lombard" effect	This parameter should only be assessed if a suspended ceiling has been installed. Attenuation of the amplification of the room as much as possible by reducing reverberation.		$\frac{A}{S_{\text{Floor}}} \geq 0,9$
Limit the disturbance due to exterior noise	Attenuation of exterior noise		Internal noise level (ventilation turned off): — $L_{\text{Aeq,T}} \leq 41$ dB[a] without reverberation control — $L_{\text{Aeq,T}} \leq 38$ dB[a] where reverberation control is in place
Limit the disturbance due to interior noise sources	Limit the noise level of equipment such as ventilation systems, elevators...		Intermittent $L_{\text{max}} < 40$ dB
Avoid poor insulation between adjacent spaces in case of subdivision	Attenuation of interior noise		$D_{\text{nT,A}} \geq 40$ dB Between created spaces
Support future subdivision of the space	Control of sound insulation within a tenancy		$D_{\text{nf,w}}$ for mullions and transoms of ≥ 50 dB

[a] These values account for the lack of reverberation control and furnishings in the space with a view to achieving 35 dB when in use.

Tabella 3 - Valori target per spazi di tipologia 1

Spazio di tipologia 2: attività principalmente rivolta ad una comunicazione esterna all'ambiente (tramite telefono, audio, video)

Descrizione dell'attività lavorativa:

- Le attività svolte sono differenti e si svolgono prevalentemente per telefono (commerciale, tecnico);
- Esempi: assistenza, servizi di informazione, sondaggi, servizi di emergenza, ecc;
- Lavori non diversificati e non collaborativi;
- Esempi: centri di relazione con i clienti, call center, contact center, ecc.

Caratteristiche acustiche dello spazio:

- Molteplici fonti di rumore, con significativo rumore di fondo influenzato dall'*Effetto Lombard*;
- Oltre alla comunicazione con i clienti può intercorrere anche la comunicazione fra colleghi (team-short-long);

- Necessità di media/alta concentrazione.

Sfide acustiche, parametri e valori:

- Limitare l'esposizione uditiva al rumore ambientale e al livello di rumore causato dalla comunicazione al telefono;
- Ottenere un elevato livello di intelligibilità con un cliente per ridurre al minimo il livello di rumore nell'orecchio e lo sforzo vocale dell'operatore;
- Controllo e riduzione al minimo dei fenomeni di riverberazione e di propagazione del suono.

Interaction	Acoustic challenges	Description, criterion	Target values	Required values
At workstation	Improving intelligibility at workstation (telephone activity: frequent short conversations) Limiting noise exposure	Achieving a suitable signal-to-noise ratio	$L_{Aeq,T} \leq 55$ dB [a]	
Between workstations	Reducing disturbance between adjacent workstations	Increasing discretion by reducing intelligibility between workstations		Attenuation $D_{A,S} \geq 6$ dB
On the floorplate	Minimising effect of many simultaneous sources Preventing "Lombard" effect Reducing voice-related disturbance	Attenuating amplification inherent to room as much as possible by reducing reverberation Reducing voice propagation in room		$T_r \leq 0{,}5$ s [b] $T_r \leq 0{,}8$ s at 125 Hz Noise reduction inside room $D_{2,S} \geq 7$ dB $L_{p,A,S,4\,m} \leq 47$ dB

[a] During activity (see Annex E).

[b] Arithmetic mean of times for octave bands centred on 250 to 4 000 Hz.

Tabella 4 - Valori target per spazi di tipologia 2

Spazio di tipologia 3: attività principalmente basata sulla collaborazione fra persone disposte in postazioni di lavoro vicine

Descrizione dell'attività lavorativa:

- Attività collaborative e progetti di gruppo;
- Comunicazione fra colleghi ad alta voce, conversazioni telefoniche, brevi compiti individuali;

- Esempi: agenzie pubblicitarie, dipartimenti creativi/marketing, consulenza ingegneri, ecc;
- Lavoro vario e collaborativo.

Caratteristiche acustiche dello spazio:

- Numerose fonti di rumore simultanee;
- Variazione continua delle condizioni acustiche dello sforzo vocale dei lavoratori;
- Privacy e team working nello stesso ambiente.

Sfide acustiche, parametri e valori:

- Massimizzare l'intelligibilità fra workstation di ogni team;
- Assicurare una giusta privacy per le comunicazioni telefoniche;
- Evitare l'interferenza fra gruppi di lavoro.

Interaction	Acoustic challenges	Description, criterion	Target values	Required values
At workstation	Ability to communicate without raising voice	Good to excellent intelligibility at workstation when speaking normally	$L_{Aeq,T} \leq 52$ dB [a]	
Between workstations	Communicating between team members Satisfactory intelligibility within team when speaking normally	Moderate attenuation between same team workstations		Attenuation $D_{A,S} \geq 4$ dB
On floorplate	Reducing disturbance between teams	Attenuating amplification inherent to room as much as possible by reducing reverberation Reducing noise in room by doubling distance		$T_r \leq 0{,}5$ s [b] $T_r \leq 0{,}8$ s at 125 Hz $D_{2,S} \geq 8$ dB $L_{p,A,S,4\,m} \leq 48$ dB

[a] During activity (see Annex E).

[b] Arithmetic mean of times for octave bands centred on 250 Hz to 4 000 Hz.

Tabella 5 - Valori target per spazi di tipologia 3

Spazio di tipologia 4: attività basata in piccola parte su lavoro collaborativo

Descrizione dell'attività lavorativa:

- Attività prevalentemente individuali, poco diversificate con saltuarie conversazioni;
- Esempi: amministrazione, contabilità, risorse umane, acquisti, ecc;
- Alto livello di concentrazione dei dipendenti;
- Lavoro poco collaborativo;
- Non si possono tenere discussioni in questo tipo di spazi per evitare di disturbare i colleghi e per motivi di privacy (presenza di aree private).

Caratteristiche acustiche dello spazio:

- Personale raggruppato in servizi di una decina di persone, che occasionalmente possono comunicare insieme;
- Comunicazione orale a voce bassa e di breve durata (sporadicamente, fra colleghi o per telefono);
- Livello di rumore ambientale basso;
- L'ambiente acustico generale deve supportare l'esecuzione di lavoro intellettuale che richiede un livello elevato di concentrazione;
- Attenuazione del disturbo causato dalle conversazioni in reparti adiacenti.

Sfide acustiche, parametri e valori:

- Raggiungere un alto livello di intelligibilità sulla postazione di lavoro;
- Ridurre l'intelligibilità tra le postazioni di lavoro adiacenti (ad eccezione di conversazioni occasionali);
- Ridurre la distrazione fra diversi servizi operanti sullo stesso pianale.

Interaction	Acoustic challenges	Description, criterion	Target values	Required values
Workstation	High level of intelligibility at workstation	Low ambient noise Intelligibility good to excellent when speaking at normal level	$L_{Aeq,T} \leq 48$ dB [a]	
Between workstations	Need for discretion among workstations Average intelligibility among workstations	High level of attenuation		Attenuation $D_{A,S} \geq 6$ dB
On floorplate	Reducing disturbance from conversations in other services	Attenuating amplification inherent to room as much as possible by reducing reverberation Reducing noise in room by doubling distance		$T_r \leq 0{,}5$ s [b] $T_r \leq 0{,}8$ s at 125 Hz $D_{2,S} \geq 7$ dB $L_{p,A,S,4m} \leq 47$ dB

[a] During activity (see Annex E).

[b] Arithmetic mean of times for octave bands centred on 250 Hz to 4 000 Hz.

Tabella 6 - Valori target per spazi di tipologia 4

Spazio di tipologia 5: attività che possono implicare la ricezione di pubblico

Descrizione dell'attività lavorativa:

- Aree di accoglienza presso enti pubblici, assicurazioni, banche, negozi, ecc;
- Amministrazione, contabilità risorse umane, acquisti, ecc;
- Lavoro individuale e poco collaborativo, incontri personali, molte interazioni faccia a faccia con i clienti;
- I clienti possono essere ricevuti in piedi, di fronte a postazioni di lavoro di tipo "banco" o seduti in postazioni di lavoro di tipo "scrivania";
- Il personale potrebbe dover inserire dati e redigere rapporti fra le riunioni, livello abbastanza sostenuto di concentrazione;
- Le discussioni fra dipendenti e clienti sono spesso direttamente legate alla vita personale e quindi deve essere garantito un elevato grado di discrezionalità.

Caratteristiche acustiche dello spazio:

- Principali fonti di rumore: ambiente esterno (musica, traffico, ecc.), rumore delle strumentazioni, segnali di chiamata in arrivo e discussioni fra le persone nella stanza;
- I livelli di voce in questo tipo di spazio possono variare in modo significativo a seconda del lavoro e della variazione dell'attività (ad esempio i periodi di punta);

- Il livello di rumore ambientale è generalmente molto elevato, le emissioni sonore sono regolari e talvolta molto distinte.

Sfide acustiche, parametri e valori:

- Il livello di rumore ambientale non deve disturbare il lavoro intellettuale e deve consentire la concentrazione;
- L'intelligibilità deve essere eccellente alla postazione di "accoglienza clienti", bassa tra le aree di attesa e le postazioni di accoglienza clienti, e bassa tra le diverse postazioni di accoglienza clienti.

Interaction	Acoustic challenges	Description, criterion	Target values	Required values
Workstation/ counter	High level of intelligibility at workstation	Acceptable ambient noise	$L_{Aeq,T} \leq 55$ dB [a]	
Between workstations	Need for discretion between workstations	High level of attenuation		Attenuation $D_{A,S} \geq 6$ dB
On the floorplate	Ensuring that ambient noise level at reception workstations shall not disturb intellectual work or concentration and shall ensure a high level of comfort. Providing adequate isolation from outside noise Minimising extent of disturbance due to noise emissions (customer, incoming call, signals, etc.)	Attenuating amplification inherent to room as much as possible by reducing reverberation Providing adequate isolation from outside noise		$T_r \leq 0{,}8$ s [b] $T_r \leq 1{,}0$ s at 125 Hz $L_{Aeq,1hr} \leq 50$ dB - unoccupied

[a] During activity (see Annex E).

[b] Arithmetic mean of times for octave bands centred on 250 Hz to 4 000 Hz.

Tabella 7 - Valori target per spazi di tipologia 5

Spazio di tipologia 6: combinazione di attività nello stesso ambiente

Descrizione dell'attività lavorativa:

- Varietà di attività all'interno dello stesso spazio;

- Coesistenza di lavoro individuale, sia in aree designate che in aree comuni, di lavoro collettivo (collaborazione mirata o creativa) e non formali (ristoro, recupero, benessere fisico, ecc.);
- Lavoro individuale basato su una postazione di lavoro in un'area confinata con scarsa attività di collaborazione, conversazione e discussione;
- Spazi per riunioni formali.

Caratteristiche acustiche dello spazio:

- Variazione dei livelli sonori della sorgente e di privacy a seconda del tipo di attività;
- Adiacenza fra aree distinte ad attività diverse.

Sfide acustiche, parametri e valori:

- Consentire un'atmosfera vivace in un'area e allo stesso tempo mantenere un ambiente più riservato in altre parti dello spazio;
- Adeguato isolamento acustico tra i gruppi;
- Il progetto acustico deve supportare la vicinanza di diverse tipologie di spazi;
- Maggiore è la differenza di attività, maggiore dovrà essere l'attenuazione del campo acustico fra queste.

Receiver space type	Informal meetings (open plan)	Outside of the room communica-tion (phone)	Collabora-tive	Non-collaborative	Focussed phone	Focussed individual work
Workstation noise level (dBA)	48	48	45	42	42	40

Tabella 8 - Livelli di rumore delle postazioni di lavoro in funzione dei diversi tipi di attività

Source/receiver space type	Informal meetings (open plan)	Outside of the room communica-tion (phone)	Collabora-tive	Non-collaborative	Focussed phone	Focussed individual work
Social and welfare	15	15	18	24	27	32
Informal meetings (open plan)	15	12	15	21	24	29
Outside of the room communication (phone)			12	18	21	29
Collaborative				18	21	26
Non-collaborative					18	23
Focussed phone					21	26
NOTE 1 In order to keep the noise level within the social and welfare space under control and avoid Lombard effect, a certain amount of absorption is needed. It is recommended to have an absorption area of at least 90 % of the floor surface. $A/S_{Floor} = 0{,}9$.						
NOTE 2 These values are derived based on assumptions regarding background sound levels, source vocal effort, and proposed signal to noise ratios. These values may vary depending on the context.						

Tabella 9 - Valori target per spazi di tipologia 6

A valle di questa classificazione, la norma individua i parametri che servono per progettare un corretto spazio in funzione delle tipologie di attività svolte al suo interno:

- Tempo di riverberazione T_r;
- Attenuazione del parlato in situ $D_{A,S}$;
- Livello di pressione sonora a 4 metri $L_{p,A,S,4m}$;
- Rapporto fra l'area di assorbimento equivalente e la superficie del pavimento A/S_{floor}.

Oltre ad indicare delle guide intese come approcci al problema, nei casi di progetti di nuova costruzione o di ristrutturazione di spazi *open-office*, la ISO 22955 indica inoltre alcuni esempi di regole da osservare durante lavori collettivi, una sorta di "etichetta" comportamentale; eccone una lista:

- Evitare lunghe discussioni nell'area;
- Parlare piano al telefono e coi colleghi;
- Evitare di parlare mentre si cammina;
- Tenere chiamate e riunioni in uffici chiusi o in spazi dedicati;
- Evitare discussioni fra postazioni di lavoro distanti, favorendo messaggistica istantanea o sale riunioni;

- Regolare il volume delle cuffie;
- Ridurre il volume della suoneria di telefoni fissi, favorendo indicatori luminosi;
- Non usare il vivavoce dei telefoni;
- Impostare i telefoni in modalità vibrazione;
- Preferire lavori di gruppo e zone vicine per visitatori esterni all'interno dell'area;
- Evitare riunioni o corsi di formazione nella postazione di lavoro;
- Non affiggere documenti su schermi o pannelli acustici.

3.4. I requisiti per la privacy

I principali indicatori per la valutazione della privacy acustica in uffici open-space sono lo *Speech Transmission Index* (EN 60268-16:2011), largamente utilizzato in Europa, e l'*Articulation Index*, storicamente adottato negli Stati Uniti d'America e recentemente sostituito dallo *Speech Intelligibility Index* (ANSI S3.5:1997).

Mentre per l'intelligibilità l'obbiettivo è di massimizzare il valore dell'indice, per la privacy è quello di minimizzarlo. Il requisito di privacy si valuta tra postazioni limitrofe; risulta quindi importante che il parlato sia fortemente attenuato nella sua propagazione nello spazio. Sono stati dunque introdotti alcuni indici di attenuazione spaziale del livello del parlato e dello *STI*, e distanze oltre le quali si garantisce minima disattenzione e adeguata privacy.

Con lo scopo di mascherare il parlato, spesso vengono utilizzati dei rumori mascheranti artificiali, di cui ne vengono definiti dei livelli ottimali.

Attenuazione spaziale del livello del parlato e dello *Speech Transmission Index*

Al fine di garantire una buona privacy acustica in un ufficio open-space, la norma UNI EN ISO 3382-3:2012 specifica valori di riferimento per i seguenti parametri acustici:

- $L_{p,A,S,4m}$ livello sonoro ponderato A del discorso parlato "normale" a 4 m dalla sorgente;
- $D_{2,s}$ indice di attenuazione spaziale del livello sonoro ponderato A del parlato al raddoppio della distanza dalla sorgente [dB];
- r_D distanza di distrazione [m];
- r_P distanza di privacy [m].

Questi parametri sono misurabili con un microfono e una sorgente omnidirezionale che emette rumore rosa, posizionati all'altezza della persona seduta a 1,2 m dal pavimento, in

ufficio non occupato. Come riferimento viene utilizzato il caso più sfavorevole in cui sono presenti un unico parlatore e gli altri occupanti in silenzio.

Per determinare il livello sonoro ponderato A del parlato, nello spettro di riferimento in bande d'ottava, si applica la norma ANSI S3.5:1997 e viene così rappresentato uno sforzo "normale" del parlato *unisex*, inteso come media fra quello maschile e quello femminile (Tabella 10).

Frequenza [Hz]	Livello di potenza sonora $L_{w,s}$ [dB]	Livello di pressione sonora (con sorgente direttiva "parlatore" alla distanza di 1 m in campo libero) $L_{p,s,1m}$ [dB]	Livello di pressione sonora (con sorgente omnidirezionale alla distanza di 1 m in campo libero) $L_{p,s,1m}$ [dB]	Ponderazione A [dB]
125	60,9	51,2	49,9	-16,1
250	65,3	57,2	54,3	-8,6
500	69,0	59,8	58,0	-3,2
1000	63,0	53,5	52,0	0,0
2000	55,8	48,8	44,8	1,2
4000	49,8	43,8	38,8	1,0
8000	44,5	38,6	33,5	1,1
Livello globale ponderato A	68,4	59,5	57,4	

Tabella 10 - Livello di potenza sonora e livello di pressione sonora del parlato "normale" unisex alla distanza di 1 m in campo libero dal centro acustico di una sorgente direttiva "parlatore" e di una sorgente omnidirezionale, per le bande di ottava e globale (ANSI S3.5:1997)

Il livello sonoro globale ponderato A corrispondente è di 57,4 dB(A) a 1 m in campo libero. Stabilito che per le misurazioni è suggerita, come detto, una sorgente omnidirezionale, i livelli sonori nelle bande di ottava da 125 Hz a 8 kHz rappresentano un valore medio di radiazione sonora in tutte le direzioni.

L'indice di attenuazione spaziale del livello sonoro ponderato A del parlato al raddoppio della distanza dalla sorgente $D_{2,s}$ rappresenta la pendenza, in decibel per il raddoppio della

distanza, dalla curva di decadimento del livello del parlato nello spazio per una serie di distanze dalla sorgente. Sull'asse x la distanza *r* [m], sull'asse y il livello di pressione sonora ponderato A $L_{p,A}$ [dB(A)].

Analiticamente, il decadimento dell'energia sonora, calibrata sul parlato, al raddoppio della distanza, viene definito dalla ISO 14257 con la seguente formula:

$$D_{2,S} = -\log 2 \frac{N \sum_{n=1}^{N} \left[L_{p,A,S,n} \log\left(\frac{r_n}{r_0}\right) \right] - \sum_{n=1}^{N} L_{p,A,S,n} \sum_{n=1}^{N} \log\left(\frac{r_n}{r_0}\right)}{N \sum_{n=1}^{N} \left[\log\left(\frac{r_n}{r_0}\right) \right]^2 - \left[\sum_{n=1}^{N} \log\left(\frac{r_n}{r_0}\right) \right]^2} \quad (46)$$

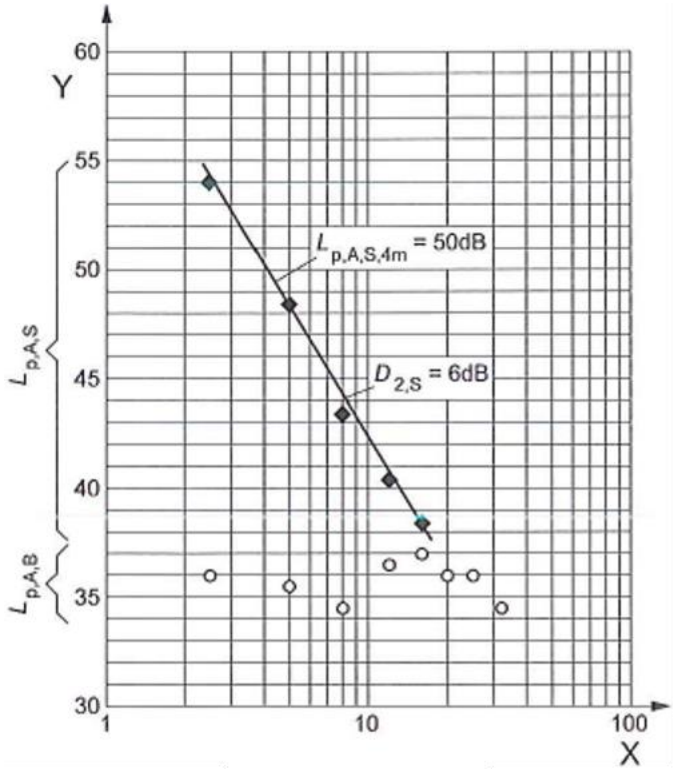


Figura 37 - Esempio di determinazione del livello sonoro ponderato A del discorso parlato "normale" a 4 m dalla sorgente $L_{p,A,s,4m}$ e dell'indice di attenuazione spaziale del livello sonoro ponderato A del parlato al raddoppio della distanza dalla sorgente $D_{2,s}$. $L_{p,A,,s}$ è il livello sonoro ponderato A del parlato e $L_{p,A,,B}$ è il livello ponderato A del rumore di fondo (ISO 3382-2:2012)).

$D_{2,s}$ è un'applicazione di DL_2, dove al posto del rumore rosa e della valutazione in bande di frequenza si considerano lo spettro del parlato "normale" e l'attenuazione del livello sonoro globale ponderato A.

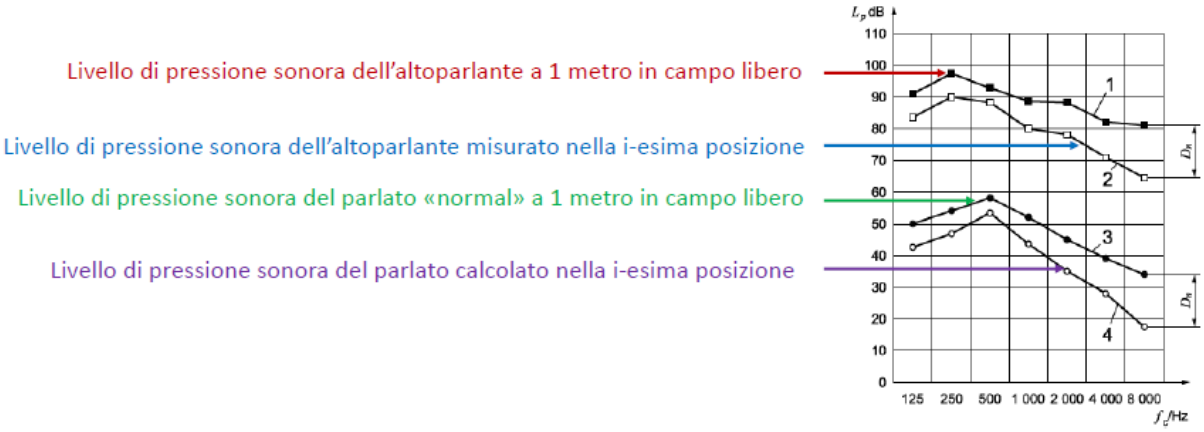


Figura 38 - Determinazione di $D_{2,s}$ presentata graficamente

La distanza, o raggio, di distrazione r_D e la distanza di privacy r_P si determinano dalla regressione lineare dei valori di *STI* in funzione della distanza dalla sorgente, quest'ultima rappresentata su scala lineare. Per la misurazione dello *STI* il rumore di fondo è determinato dal rumore degli impianti, dal traffico esterno e, se presente, dal sistema sonoro di mascheramento artificiale.

La distanza di distrazione è la distanza dalla sorgente in cui lo *STI* si riduce a 0,50, mentre la distanza di privacy è la distanza dalla sorgente in cui lo *STI* si riduce a 0,20. Oltre la distanza di disattenzione, la concentrazione e la privacy sono paragonabili a quelle ottenute tra uffici separati. Sull'asse x la distanza *r* [m], sull'asse z lo *STI* [adim].

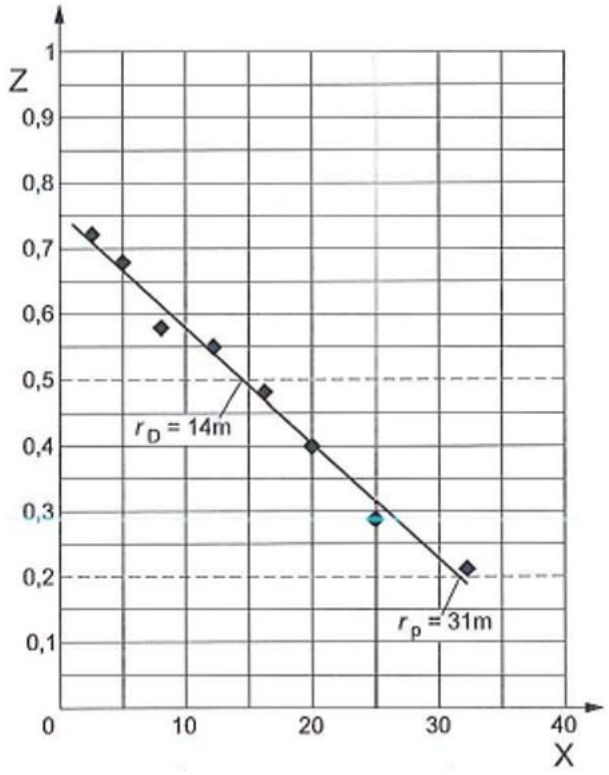


Figura 39 - Esempio di determinazione della distanza di disattenzione r_D e della distanza di privacy r_P (ISO 3382-2:2012)

I valori limite di *STI* indicati per le due distanze derivano dal modello riportato in Figura 39, dove è rappresentato l'effetto dell'indice di intelligibilità sulla variazione della prestazione per compiti che richiedono concentrazione e competenze cognitive. L'effetto negativo sulla prestazione lavorativa (Figura 40) inizia a ridursi rapidamente per *STI* < 0,50 e scompare per *STI* < 0,20. Sull'asse x lo *STI* [adim], sull'asse y la produttività [%].

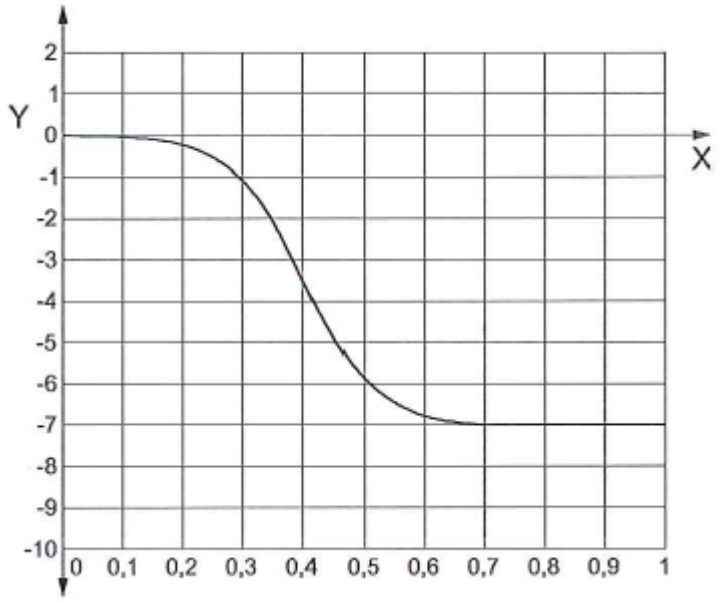


Figura 40 - Effetto dello *STI* sulla prestazione di compiti che richiedono competenze cognitive (ISO 3382-3:012)

Valori riportati nei casi di open-space, con scarse o insufficienti condizioni acustiche, sono $D_{2,s} < 5$ dB, $L_{p,A,S,4m} > 50$ dB e $r_D > 10$ m. Nel caso di open-space con buone condizioni acustiche si misurano invece $D_{2,s} \geq 7$ dB, $L_{p,A,S,4m} \leq 48$ dB e $r_D \leq 5$ m.

Speech Intelligibility Index e Livello del rumore mascherante

L'*Articulation Index AI* è indicato dalla norma ASTM E 1130:2002 per la valutazione della privacy negli uffici open-space. *AI* è il rapporto segnale/rumore ponderato che varia fra 0 e 1. Un valore prossimo a 1 corrisponde ad una quasi perfetta intelligibilità, mentre un valore vicino a 0 corrisponde ad una quasi perfetta privacy della parola.

Recentemente l'*AI* è stato sostituito dallo *Speech Intelligibility Index SII* definito dalla norma ANSI S3.5. Una privacy "confidenziale", caratterizzata dalla comprensione di poche parole isolate, corrisponde ad uno $SII \leq 0{,}10$, mentre una privacy "accettabile", caratterizzata dalla comprensione di parole solo in caso di elevata concentrazione, rappresenta l'obbiettivo di buon progetto acustico negli open-space, e corrisponde ad uno $SII \leq 0{,}20$.

La privacy della parola dipende dal livello del parlato e dal livello del rumore nella posizione dell'ascoltatore. Nonostante il livello di sforzo vocale "normale" sia usato frequentemente per determinare la privacy negli open-space, da misurazioni effettuate su numerosi parlatori in molti uffici è stato rilevato uno sforzo vocale medio più basso. Per i

calcoli di privacy della parola con lo SII, si ritiene quindi più rappresentativo un livello di pressione sonora a 1 m di distanza dal parlatore di 53,2 dB(A), indicato come *Intermediate Office Speech Level IOSL*, ottenuto aggiungendo un valore di deviazione standard al livello medio misurato.

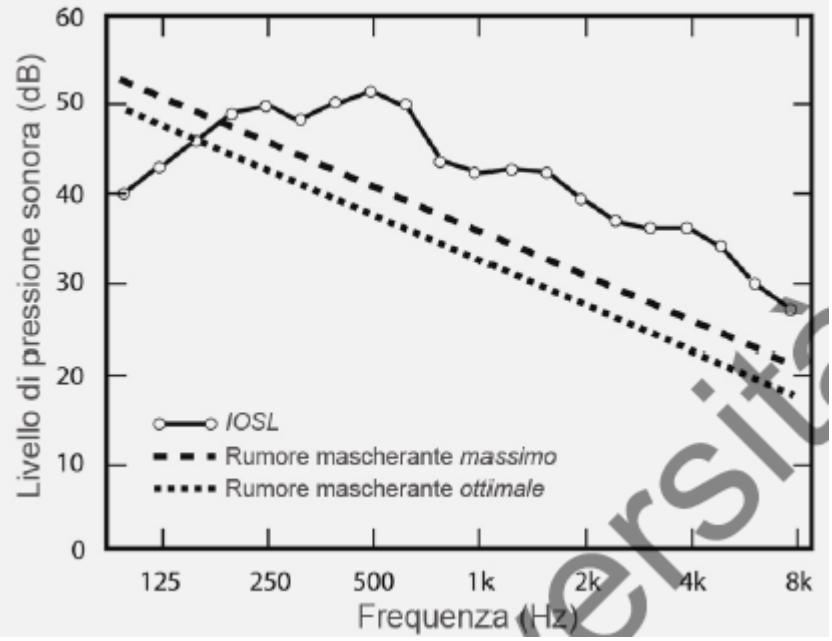


Figura 41 - Spettro del rumore mascherante "ottimale" e "massimo" in un ufficio open-space e spettro dell'Intermediate *Office Speech Level IOSL*. Lo spettro del rumore mascherante approssima quello delle curve *RC 38* (ottimale) e *41* (massimo), che sono riportati nel grafico. *IOSL* è il livello di pressione sonora ad 1 m di distanza dal parlatore ottenuto aggiungendo un valore di deviazione standard al livello medio misurato in numerosi uffici *open-space*)

Anche se un innalzamento del livello di rumore di fondo comporta un incremento della privacy, esiste un livello sonoro limite oltre il quale il rumore diventa più disturbante e meno utile. Tra diversi rumori mascheranti, si consiglia un rumore elettronico, data la difficoltà di regolare il livello e lo spettro del rumore dell'impianto di ventilazione.

Lo spettro del rumore mascherante è caratterizzato da energia acustica concentrata nelle bande di frequenza del parlato e si percepisce come un rumore di ventilazione.

Esistono regole empiriche secondo le quali il livello di rumore mascherante (o naturale ambientale) non dovrebbe superare i 48 dB(A). Il primo è definito come "massimo" rumore mascherante, il secondo come rumore mascherante "ottimale".

Il rumore mascherante dovrebbe essere uniformemente distribuito nell'ufficio (eventuali variazioni dovrebbero essere inferiori a 3 dB). Come accennato, il più comune e accettato rumore mascherante è il rumore generato dalla ventilazione, anche se i suoni a larga banda, come quello dell'acqua zampillante di una fontana, rappresentano una valida alternativa.

3.5. Linee guida per la progettazione acustica

Il fine ultimo della progettazione acustica di un ufficio *open-space* è sostanzialmente quello di incrementare la privacy della parola fra due postazioni di lavoro adiacenti.

I diversi percorsi di propagazione del suono comportano alcuni fattori: principalmente il suono può essere riflesso dal soffitto e dal pavimento, diffratto sul bordo del pannello divisorio o trasmesso attraverso lo stesso pannello.

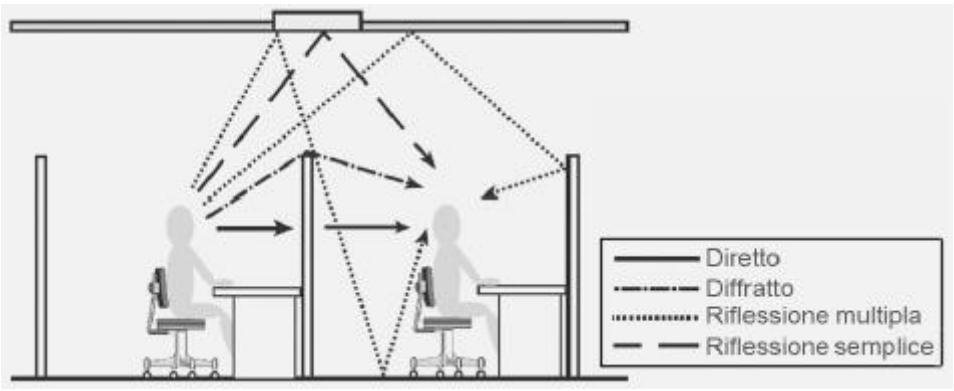


Figura 42 - Percorsi di propagazione del suono fra due postazioni di lavoro adiacenti in un ufficio *open-space*

L'effetto sulla privacy acustica è stato valutato con modelli matematici di propagazione del suono attraverso postazioni di lavoro in uffici *open-space* di tipo convenzionale, implementati in ambienti di simulazione numerica.

Assumendo due postazioni di lavoro di forma quadrata con pannelli divisori fra una postazione e l'altra, un parlatore al centro di una postazione con livello di sforzo vocale *IOSL* ed un ricevitore al centro di quella adiacente, entrambi seduti, è stata analizzata l'influenza di diversi fattori acustici ed architettonici sulla privacy acustica con l'obbiettivo di ottenere una privacy "accettabile" ($SII \leq 0{,}20$).

I fattori più influenti sono stati:

i. l'assorbimento acustico del soffitto;
ii. l'altezza dei pannelli fra le postazioni di lavoro;
iii. la dimensione in pianta della postazione di lavoro.

Anche se meno rilevanti, non devono comunque essere trascurati altri parametri come:

a. l'assorbimento acustico dei pannelli divisori;
b. l'isolamento acustico dei pannelli;
c. l'assorbimento acustico del pavimento;
d. l'altezza del soffitto;
e. i dettagli di montaggio a soffitto degli apparecchi di illuminazione.

Descrittore	Esempi di progetto			
	A	B	C	D
Assorbimento acustico del controsoffito[a]	0,90	0,95	0,97	0,95
Altezza dei pannelli divisori[a]	1,7 m	1,6 m	1,7 m	1,7 m
Dimensioni della postazione di lavoro	0,70	0,70	0,70	0,80
Assorbimento acustico del pavimento[a]	3 x 3 m	3 x 3 m	3 x 3 m	2,5 x 2,5 m
Isolamento acustico dei pannelli divisori[b]	0,20	0,20	0,20	0,20
Altezza del soffitto	2,7 m	2,7 m	2,7 m	2,7 m
Tipo ed installazione degli apparecchi luminosi	Assenti	Assenti	Schermo con griglia aperta al centro del soffitto sopra ogni postazione di lavoro	Assenti
SII	0,20	0,20	0,19	0,20

[a] Valore medio del coefficiente di assorbimento acustico in bande di terze d'ottava da 200 Hz a 3,15 kHz

[b] *Sound Transmission Class* (ASTM E413-87:1999), misura di laboratorio

Tabella 11 - Esempi di progetto di postazioni di lavoro in uffici *open-space* caratterizzati da un livello di privacy "accettabile" (*SII* ≤ 0,20). In tutti i casi è previsto un livello sonoro della voce ad 1 m di distanza di 53,2 dB(A) (*IOSL*) ed un livello di pressione sonora del rumore di fondo mascherante di 45 dB(A), è riportata una serie di combinazioni dei fattori che portano alla condizione di privacy "accettabile"

Un soffitto maggiormente fonoassorbente può ulteriormente incrementare la privacy o compensare la scelta meno efficace di altri fattori.

Come indicazione generale è raccomandato per il soffitto un coefficiente di assorbimento acustico medio, fra le bande di un terzo d'ottava da 200 Hz a 3,15 kHz, superiore a 0,90.

Per essere efficace l'altezza del controsoffitto dovrebbe essere almeno 2,7 m, e non sono stati riscontrati benefici particolari nell'incrementarla fino a 3,5 m.

Gli apparecchi di illuminazione dovrebbero essere posizionati al centro della postazione di lavoro, nel controsoffitto, e non sopra i pannelli divisori fra le postazioni. Come regola generale si raccomandano griglie aperte piuttosto che schermi piatti e riflettenti.

I pannelli divisori devono essere sufficientemente alti per attenuare sia il suono diretto che il suono diffratto al di sopra del pannello. In altre parole, l'altezza dei pannelli divisori deve essere sostanzialmente maggiore dell'altezza della bocca e delle orecchie del parlatore e dell'ascoltatore seduti, pari a circa 1,2 m. Aumentare l'altezza dei pannelli oltre 1,7 m non incrementa significativamente il valore di *SII*, così come un coefficiente di assorbimento superiore o uguale a 0,7 (per ridurre la componente riflessa all'interno della postazione) e un grado di *Sound Transmission Class STC* (indice di valutazione a singolo numero delle caratteristiche di trasmissione sonora per via aerea del pannello, determinato tramite misurazioni secondo la norma ASTM E413-87:1999; il valore *STC* può essere confrontato con l'indice di potere fonoisolante R'_w ottenuto da misurazioni di laboratorio secondo le norme UNI EN ISO 10140-2:2010 e UNI EN ISO 717-1:2013) superiore a 20 dB.

Anche il pavimento deve essere assorbente, per la privacy e per ridurre il rumore da calpestio.

Postazioni di lavoro più piccole di 2 x 2 m non soddisfano il requisito di accettabilità. L'indice *SII* si riduce incrementando le dimensioni della postazione di lavoro. Per soddisfare il requisito di privacy nel caso in cui le dimensioni siano ridotte rispetto al caso base di 3 x 3 m. è necessario incrementare l'assorbimento del soffitto e alzare i pannelli divisori.

Con impatto minore rispetto agli elementi fino adesso considerati, esistono inoltre altri aspetti progettuali in grado di influenzare il livello di privacy della parola.

La disposizione in pianta delle postazioni di lavoro, ad esempio, deve essere tale da attenuare la trasmissione diretta e quella riflessa tra una postazione e l'altra. Per ridurre la

componente riflessa, le superfici verticali esterne dei pannelli che separano le postazioni di lavoro, le finestre e le ampie superfici murarie dell'ufficio dovrebbero essere rivestite da tende o materiale fonoassorbente.

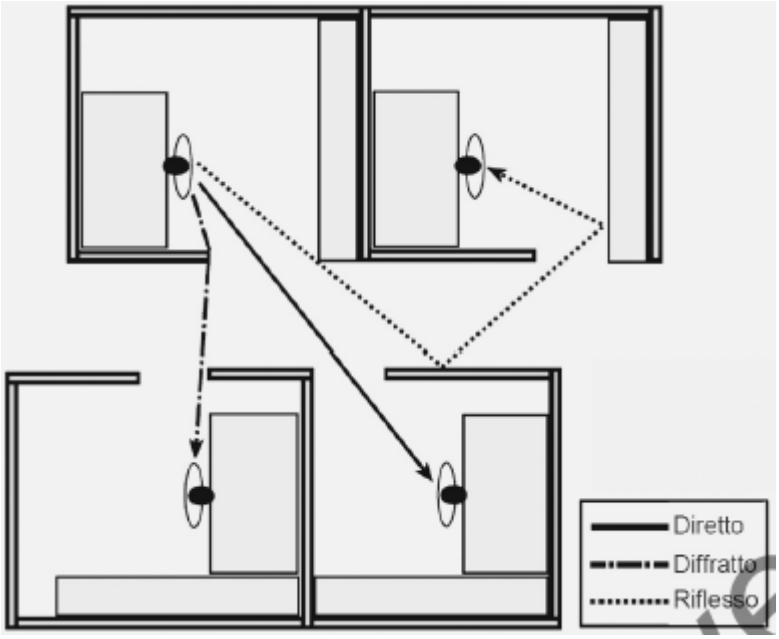


Figura 43 - Esempi di percorsi del suono diretto, diffratto e riflesso tra postazioni di lavoro in un ufficio *open-space*

Nella maggior parte degli uffici *open-space*, si tende a raggruppare le postazioni di lavoro degli occupanti in base alle mansioni da loro affidate. Talvolta si opta per una disposizione "ad isola", per favorire l'interazione e la comunicazione tra i membri di uno stesso team.

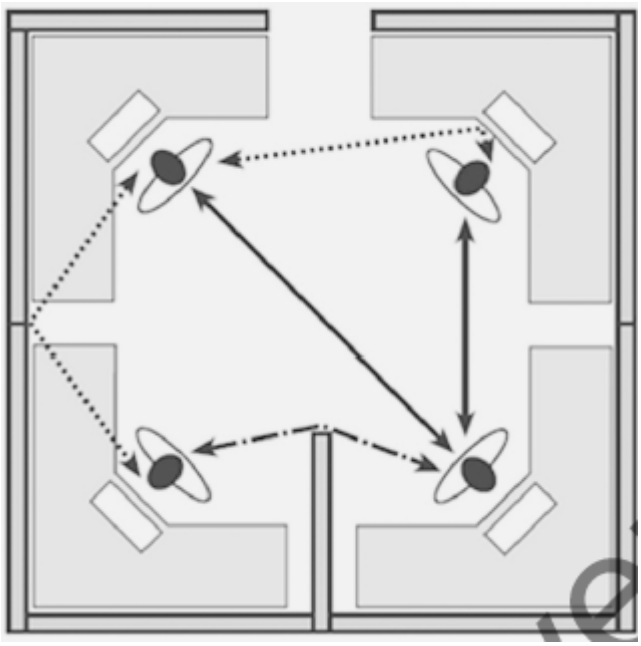


Figura 44 - Esempi di percorsi del suono diretto, diffratto e riflesso tra postazioni di lavoro di uno spazio ufficio con disposizione “ad isola”

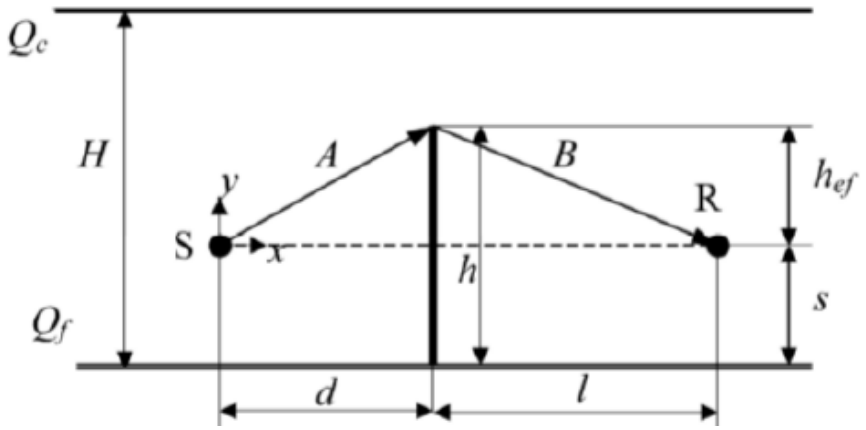
In un tale spazio, raggiungere livelli accettabili di privacy della parola risulta piuttosto difficile, dal momento che i pannelli che separano le postazioni sono stati tolti. In questo caso bisogna fare in modo che il controsoffitto, e qualsiasi altra superficie adiacente, sia il più fonoassorbente possibile (≥ 0,70 per il soffitto e ≥ 0,95 per i pannelli). Inoltre, è consigliabile cercare di distanziare il più possibile gli occupanti dell’”isola”, utilizzare barriere basse fra una postazione e l’altra in modo da evitare il contatto visivo diretto, e invitando gli occupanti a parlare a bassa voce, aumentando così la privacy senza però eliminare la percezione di condizione dello spazio.

Una buona progettazione considera inoltre l’analogia con gli ambienti industriali, per cui, in base alla tipologia di spazio acustico, si identificano i vari parametri intesi come criteri per la scelta delle soluzioni progettuali (Tabella 12).

Spazio acustico	Criteri	Soluzioni
Far region	T_r [s]	Materiale assorbente
Mid region	$D_{2,S}$ [dB], r_D [m]	Baffle, screen, arredi

Tabella 12 - Iter di buona progettazione

Nel 2002, Wang e Bradley sviluppano un modello matematico per definire una barriera a schermo singolo da impiegare negli uffici *open-office*.



$$IL = 20 \log\left[\frac{|p_0|}{|p_r + p_d + p_t|}\right] \quad (47)$$

dove:

p_0 è la pressione sonora al ricevitore, che considera il contributo delle riflessioni di soffitto e pavimento

p_r è la pressione sonora riflessa

p_d è la pressione sonora diffratta

p_r è la pressione sonora trasmessa

A titolo esemplificativo, la Figura comprende alcune delle varie soluzioni progettuali (schermi divisori e armadi posizionati fra le scrivanie di diversi gruppi di lavoro; baffle sospesi, isole; livello di rumore di fondo adeguato per mezzo di sistemi di mascheramento).

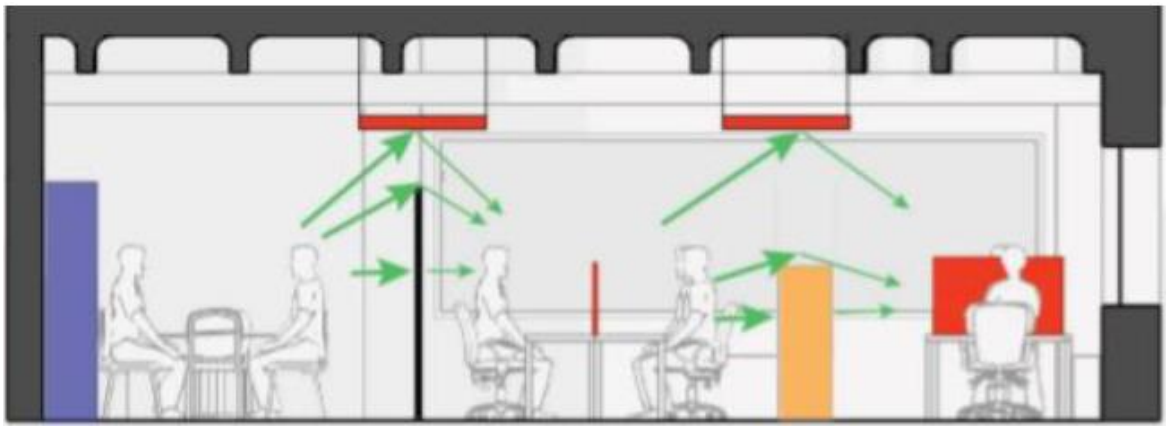
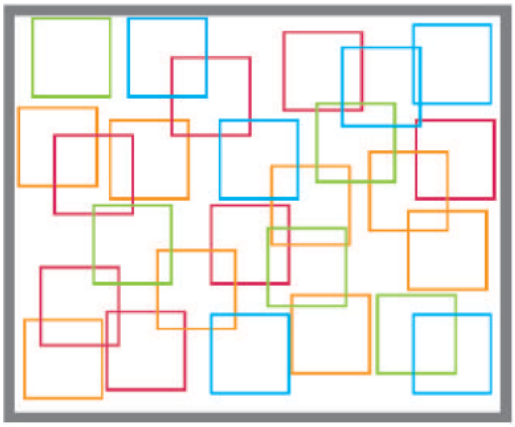


Tabella 13 - Partizione della zona ufficio per mezzo degli armadietti di altezza 1,34 m

Infine, si riporta una lista di accorgimenti da tenere in considerazione per una buona progettazione, ponendo particolare attenzione sulla differenziazione delle attività e degli spazi:

- Specializzazione degli spazi in base alle diverse esigenze professionali;
- Integrazione con le tecnologie che consentono un utilizzo più efficace degli spazi favorendo la mobilità delle persone;
- Possibilità di riconfigurare gli spazi in tempi e con costi contenuti al variare delle esigenze;
- Progettazione degli ambienti prestando attenzione al benessere e al comfort delle persone sul luogo di lavoro.

Concentration room	Collaboration room	Communication room	Contemplation room
Lavoro individuale	Gruppi di discussione	Confronto	Relax
Silenzio	Attività di gruppo	Colloqui riservati	Equilibrio
Privacy	Tavoli grandi	Riunioni in gruppo o fra pochi	Riposo
Tranquillità	Brainstorming	Presentazioni e video conferenze	
Concentrazione	Presentazioni	Tecnologia	



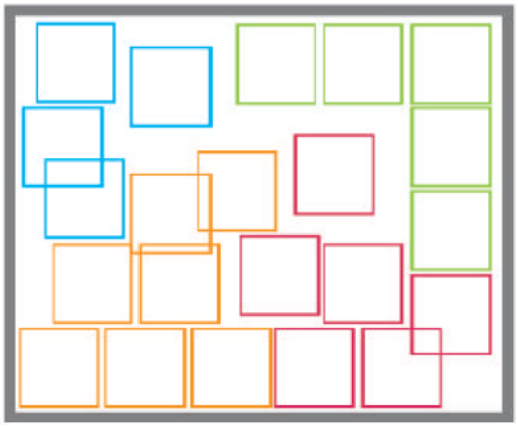


Tabella 14 - Differenziazione

Approfondimento – Indici di attenuazione spaziale DL_2 e $D_{2,S}$

L'indice di attenuazione spaziale dei livelli di pressione sonora al raddoppio della distanza DL_2 viene definito dalla norma UNI EN ISO 14257:2004 e si ottiene dalla regressione lineare del livello di pressione sonora in funzione della distanza dalla sorgente. L'attenuazione dipende dalla frequenza e si determina per le sei bande di ottava da 125 Hz a 4 kHz.

La procedura di misurazione prevede l'uso di una sorgente sonora omnidirezionale con emissione di rumore rosa. Spesso risulta utile determinare l'indice di attenuazione spaziale con sorgente tarata e spettro di frequenza normalizzato, che può corrispondere al rumore rosa ponderato A; in questo caso l'indice di attenuazione spaziale si ottiene a partire dalla somma logaritmica degli indici di attenuazione nelle diverse bande d'ottava.

La sorgente deve essere posta ad un'altezza dal pavimento maggiore di 0,5 m e il suo centro acustico deve essere almeno 3 m da qualsiasi parete e da qualsiasi oggetto riflettente diverso dal pavimento. I livelli di pressione sonora devono essere sufficientemente elevati, in ciascuna banda d'ottava, da superare il rumore di fondo di 10 dB nel punto di misurazione più distante.

Il percorso di misurazione deve essere orientato lungo una linea di visuale libera dalla sorgente e deve essere sgombro da qualsiasi struttura riflettente di grandi dimensioni ad una distanza di almeno 1,5 m su entrambi i lati. Tipicamente, si considerano una serie di distanze di misurazione comprese fra 5 e 16 m dalla sorgente. L'altezza preferita del percorso è 1,55 m (che simula una persona in posizione eretta) e 1,2 m (che simula una persona seduta).

L'indice di attenuazione spaziale del livello del parlato al raddoppio della distanza dalla sorgente $D_{2,S}$, definito dalla norma UNI EN ISO 3382-3:2012, è un'applicazione del DL_2, dove invece del rumore rosa viene considerato lo spettro del parlato "normale" e invece della determinazione dell'attenuazione in bande di frequenza si considera l'attenuazione del livello globale ponderato.

Vengono suggerite da 6 a 10 misurazioni lungo un percorso rettilineo o non rettilineo che attraversa le postazioni di lavoro, nel raggio da 2 a 16 m dalla sorgente.

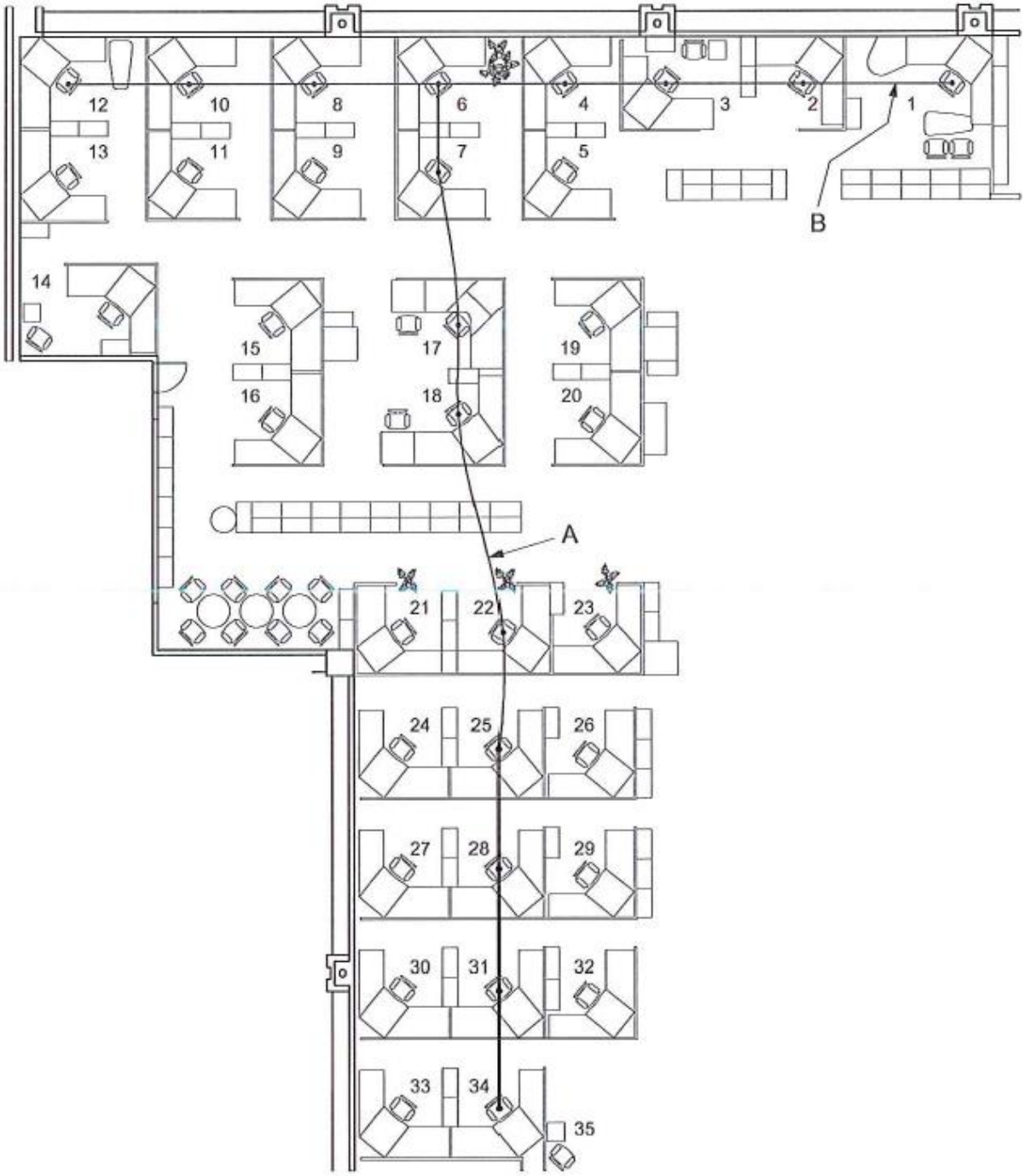


Figura 45 - Esempio di un percorso di misurazione non rettilineo (A) e rettilineo (B) in un ufficio *open-space* (ISO 3382-3:2012)

La sorgente e i microfoni devono essere distanti almeno 0,5 m dai tavoli e almeno 2 m dalle pareti e da altre superfici riflettenti ("A" in Figura 45). La procedura di misurazione prevede l'uso di una sorgente sonora omnidirezionale tarata.

La metodologia è analoga a quella per DL_2 tranne che per la scelta del percorso di misurazione, che in questo caso non è obbligatoriamente orientato lungo una linea di visuale libera dalla sorgente, e per l'altezza della sorgente e dei microfoni, che si prevede essere quella di una persona seduta.

Formule previsionali

Nel caso in cui l'ambiente non è stato ancora realizzato, e quindi non è possibile effettuare delle misure *in situ*, si ricorre a delle formule previsionali, informali, pubblicate su *Elsevier* da J. Keränen e V. Hongisto (*Finnish Institute of Occupational Health, Indoor Environment Laboratory, FIN-20520 Turku, Finland*).

Nella sezione della rivista *Applied Acoustics 74 (2013) 1315-1325*, si trova l'articolo intitolato *Prediction of the spatial decay of speech in open-plan offices*, in cui sono enunciate le formule per l'indice di attenuazione spaziale del livello del parlato al raddoppio della distanza dalla sorgente $D_{2,S}$ [dB]e per il livello di pressione sonora, ponderato A, del parlato normale a 4 metri dalla sorgente $L_{A,S,4m}$ [dB(A)].

$$D_{2,S} = 8\frac{h}{H} + 0{,}16\frac{L}{H} + 4\alpha_c + 1{,}7\alpha_f \tag{48}$$

dove:

h è l'altezza degli schermi [m];

H è l'altezza della stanza [m];

L è la lunghezza della stanza [m];

α_c è l'assorbimento del controsoffitto (c sta per "ceiling");

α_f è l'assorbimento apparente degli arredi (f sta per "forniture"), vale a dire di tutti gli elementi ad esclusione del controsoffitto.

L'incertezza comprende valori fra 0,5 ÷ 1,5 dB.

$$L_{A,S,1m} = L_{A,S,1m} - 3h - 0{,}1W - 4{,}6\alpha_c - 0{,}8\alpha_f \tag{49}$$

dove:

$L_{A,S,1m}$ è il livello di pressione sonora del parlato ad 1m dalla sorgente [dB(A)];

h è l'altezza deli schermi [m];

W è la larghezza della stanza [m];

α_c è l'assorbimento del controsoffitto (c sta per "ceiling");

α_f è l'assorbimento apparente degli arredi (f sta per "forniture"), vale a dire di tutti gli elementi ad esclusione del controsoffitto.

L'incertezza comprende valori fra 1 ÷ 2,8 dB(A).

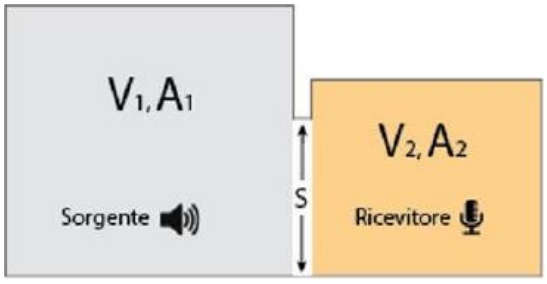
Approfondimento – Volumi accoppiati

Può verificarsi il caso in cui un unico ambiente, pur contenendo un singolo volume d'aria, risulti architettonicamente suddiviso in sottospazi più piccoli collegati fra loro, come avviene per esempio nei teatri d'opera o nelle chiese, ma anche in ambienti di più comune utilizzo come ristoranti o, appunto, uffici, implicando dirette conseguenze sulle condizioni acustiche degli ambienti e sul comfort degli utilizzatori.

Geometria regolare

V volume dell'ambiente

A area di assorbimento equivalente dell'ambiente



Spazi geometricamente identificabili ed acusticamente connessi

V_1 e V_2 volumi dei singoli spazi

A_1 e A_2 aree di assorbimento equivalente dei singoli spazi

S superficie di accoppiamento

Figura 46 - Teoria dei volumi accoppiati

Il comportamento dei volumi considerati viene definito tramite un *Fattore di accoppiamento k*, definito con la seguente formula:

$$k = \frac{S}{S + A_2} \qquad \text{con } 0 < k < 1 \qquad (50)$$

Casi limite:

$k \sim 1$: S piuttosto grande e/o valori bassi di A_2 ⇒ i due volumi si comportano come acusticamente come se fossero un unico volume;

$k \sim 0$: S molto piccola e/o valori alti di A_2 ⇒ i due volumi sono acusticamente separati;

Casi intermedi ⇒ volumi accoppiati.

Nel caso in cui il fattore di accoppiamento raggiunge valori prossimi ad 1, è possibile definire la *Densità di energia sonora* presente nell'ambiente:

$$E = \frac{4W/c}{A_1 + A_2} \qquad (51)$$

dove:

E è la densità di energia sonora;

W è la potenza sonora della sorgente;

c è la velocità del suono;

A_1 e A_2 sono le aree di assorbimento equivalente dei volumi V_1 e V_2.

In tutti i casi intermedi, è possibile invece definire entrambe le *Densità di energia sonora* presenti negli ambienti 1 e 2:

$$E_1 = \frac{4W/c}{A_1 + kA_2} \qquad E_2 = kE_1 \tag{52}$$

Osservazioni:

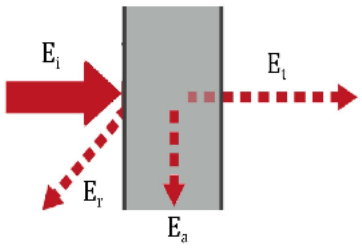
- I due volumi si influenzano vicendevolmente da un punto di vista acustico, "palleggiandosi" l'energia sonora;
- L'influenza reciproca fra i volumi accoppiati, considerando di mantenere costante *S*, è regolata da A_1 e A_2.

4. Materiali fonoassorbenti

4.1. Riflessione, assorbimento, trasmissione

L'energia sonora incidente in un corpo può essere scomposta in tre componenti che variano a seconda del tipo di materiale che incontrano (Figura 47):

$$E_i = E_r + E_a + E_t \tag{53}$$



dove:

E_i è l'energia incidente totale

E_r è la componente riflessa

E_a è la componente assorbita

E_t è la componente trasmessa

Figura 47 - Energia sonora incidente in un corpo

La relazione (53) può essere anche vista nella forma:

$$1 = \frac{E_r}{E_i} + \frac{E_a}{E_i} + \frac{E_t}{E_i} \tag{54}$$

dove:

$\frac{E_r}{E_i} = \rho$ è il coefficiente di riflessione acustica

$\frac{E_a}{E_i} = \alpha$ è il coefficiente di assorbimento acustico

$\frac{E_t}{E_i} = \tau$ è il coefficiente di trasmissione acustica

da cui ne consegue la relazione:

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \tag{55}$$

dove:

$\alpha + \tau = \alpha_a$ è il *coefficiente di assorbimento acustico apparente*.

Dalle relazioni precedenti si ricava

$$\alpha_a = \frac{E_a + E_t}{E_i} = \frac{E_i - E_r}{E_i} = 1 - \frac{E_r}{E_i} = 1 - \rho \qquad (56)$$

4.2. Materiali porosi e fibrosi

I materiali porosi e fibrosi contengono al loro interno un'alta percentuale di aria che risulta in connessione con l'ambiente esterno (materiali fibrosi e pori intesi come celle aperte).

L'onda acustica si propaga all'interno del materiale sotto forma di vibrazioni, la cui energia viene parzialmente dissipata a causa dell'attrito viscoso generato dalle superfici dei pori interni.

Esempi di materiali con queste caratteristiche sono: le fibre di vetro, le fibre minerali, i truciolati, i truciolati pressati, il cotone, il feltro, la schiuma di neoprene, la moquette, i metalli sinterizzati.

Nei materiali dissipativi la pressione acustica si muove con un andamento che varia in funzione della distanza (Figura 48).

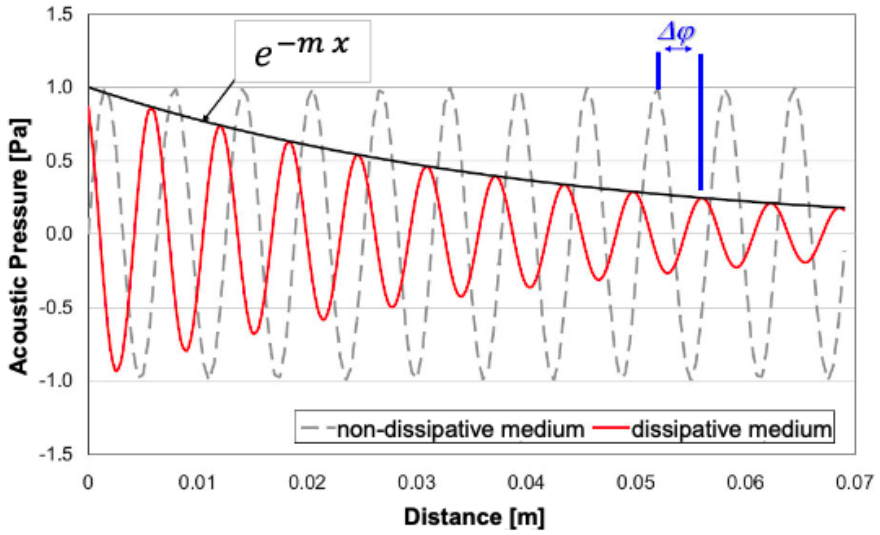


Figura 48 - Distribuzione dell'ampiezza di pressione nei materiali dissipativi (*m* è il coefficiente di attenuazione)

L'ipotesi

$$\bar{\bar{D}} = \bar{\bar{f}}(\bar{\bar{\mu}}; \vec{\nabla}\vec{v}) \cong 0 \qquad (57)$$

non è verificata perché la dissipazione è dovuta agli effetti di attrito per cui l'aria vibra in uno spazio molto stretto costituito da un sistema di cavità aperte.

La capacità di dissipare è collegata alla proprietà di *resistività del flusso del mezzo poroso* [Pa·s/m^2]

$$\sigma \equiv \frac{1}{v_x}\frac{dp}{dx} \tag{58}$$

dove v_x è la velocità dell'aria nelle cavità.

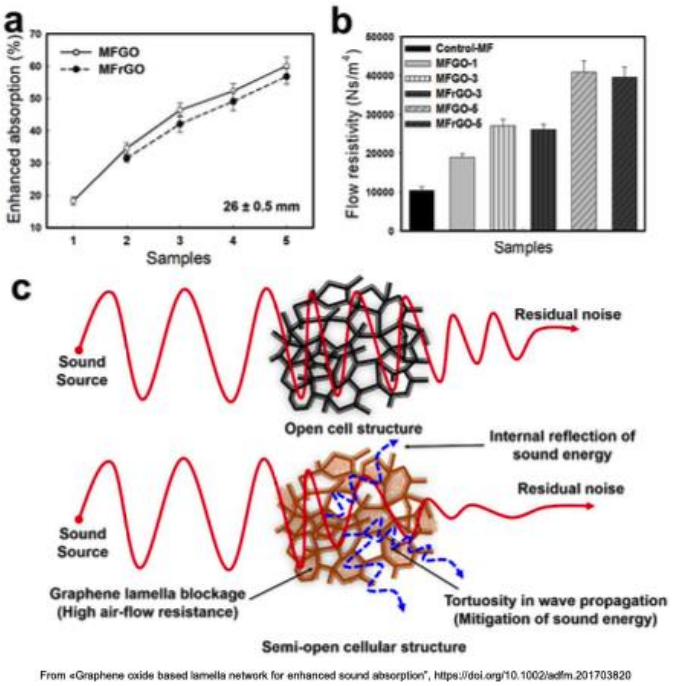


Figura 49 - Prove per le proprietà dei materiali porosi e fibrosi

La resistività del flusso deriva dalle misurazioni della Resistenza del flusso R_f. Dato il un campione di materiale poroso di spessore d, òa velocità del flusso di massa continuo attraverso il mezzo può essere descritta come:

$\dot{m} = A_\rho \frac{p_1 - p_2}{R_f}$ [kg/s] con $p_1 > p_2$

$R_f = \frac{p_1 - p_2}{\langle v \rangle_s}$ [Pa·s/m^2] = Rayl dove $\langle v \rangle_s = \frac{\dot{m}}{A_\rho}$ [m/s]

$\Rightarrow R_f = \left| \frac{\tilde{\Delta} p_1 - \tilde{\Delta} p_2}{\tilde{\Delta} v_1} \right|$ $\Rightarrow \sigma = \frac{R_f}{d}$ [Pa·s/m^2 = Rayl/m] (59)

5. Sistemi fonoassorbenti

I sistemi di assorbimento del suono possono essere classificati in quattro categorie:

a) pannelli assorbenti porosi
b) pannelli o membrane vibranti
c) assorbitori risonanti
d) assorbitori risonanti con materiale poroso

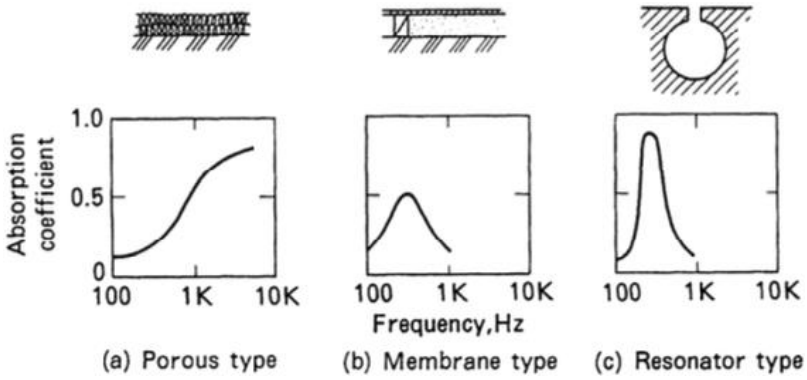


Figura 50 - Tipologie di sistemi fonoassorbenti

di cui è possibile individuare i loro differenti spettri di assorbimento in frequenza (Figura 51).

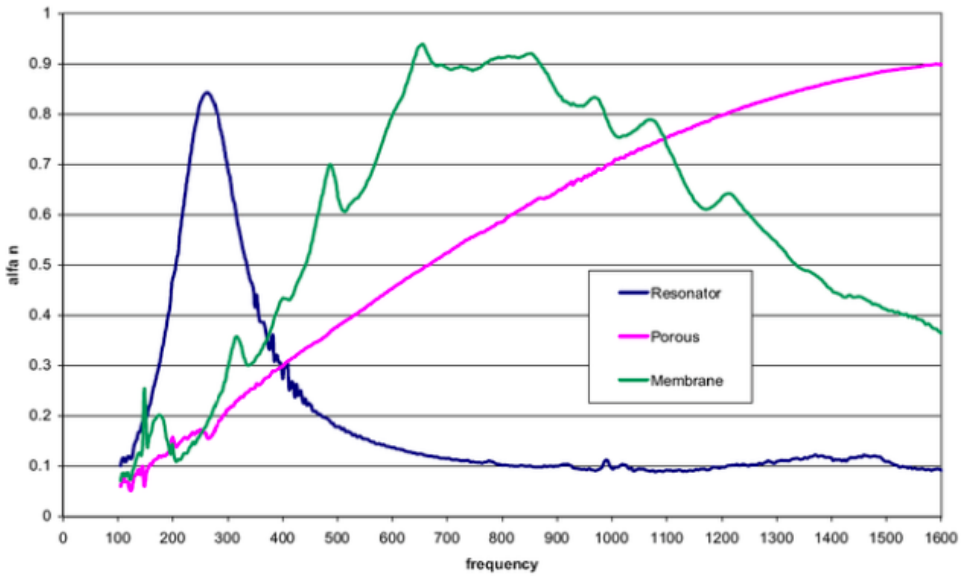


Figura 51 - Fonoassorbimento caratteristico dei diversi sistemi

5.1. Pannelli assorbitori porosi e fibrosi

Come già accennato, fanno parte di questi materiali esempi come le fibre di poliestere, le fibre di canapa e le lane minerali, cioè materiali costituiti da una matrice solida piena d'aria (percentuale di vuoti molto alta, anche sopra al 90%).

In questi materiali l'assorbimento è dovuto a fenomeni di dissipazione viscosa e termica: infatti, l'attrito delle molecole d'aria con le fibre del materiale e i pori, produce una trasformazione dell'energia sonora per trasformazione in calore.

Fra le lane minerali prendiamo come esempio la lana di roccia, di cui si riporta, con il grafico che segue (Figura 52), il comportamento dell'assorbimento, in frequenza, per pannelli con densità di massa uguale a 60 kg/m^2 ma di diverso spessore.

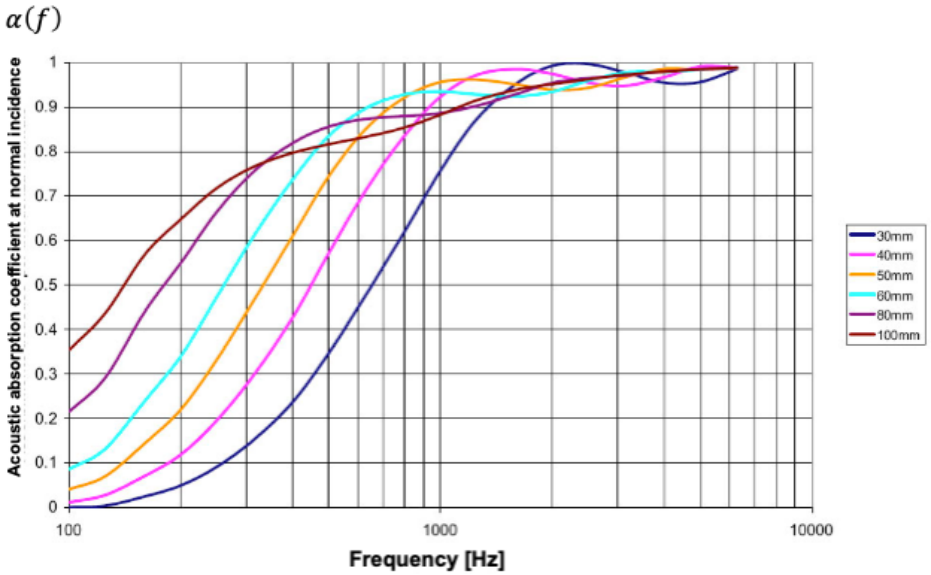


Figura 52 - Assorbimento di un pannelllo in lana di roccia in funzione dello spessore

A parità di densità, se c'è più spessore, e quindi più massa, l'assorbimento è maggiore nelle medie frequenze; con meno massa il pannello funziona meglio alle medio-alte frequenze. In generale l'assorbimento acustico cresce con lo spessore del materiale e con la frequenza).

Il successivo grafico, invece, mette a confronto diversi tipi di materiale mantenendo uno spessore di 40 mm (Tebella 15 e Figura 53).

Materiale	Densità [kg/m^3]	Porosità [%]	Resistività [kNs/m^4]
Fibra di roccia	50	0,99	20
Fibra di poliestere	50	0,98	6
Feltro	80	0,95	50
Fibra di canapa	50	0,98	6

Tabella 15 - Proprietà fisiche di alcuni materiali fibrosi

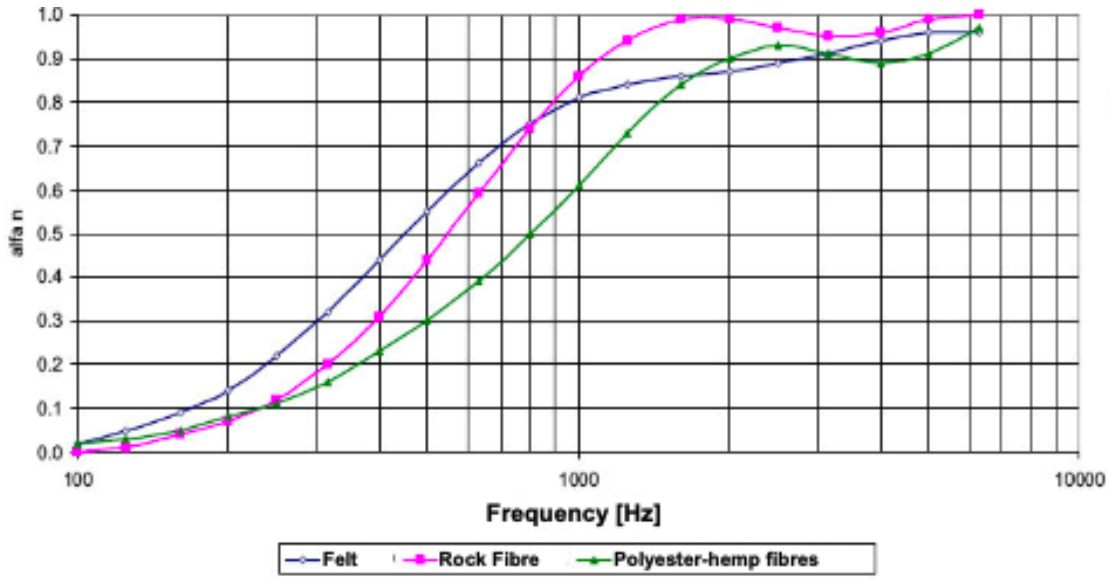


Figura 53 - Assorbimento, in frequenza, di alcuni materiali fibrosi

5.1.1. Applicazioni di pannelli porosi

La quantità di pori nei pannelli assorbenti incide fortemente nella loro efficienza acustica.

L'onda costante prodotta da una riflessione rigida confinata di un'onda con orientamento normale ad una superficie piana è

$$\tilde{\Delta}p_{0,\omega}(x) = 2\tilde{A}\cos(kx) = = 2A\cos\left(2\pi\frac{x}{\lambda}\right)e^{i\phi_A}$$

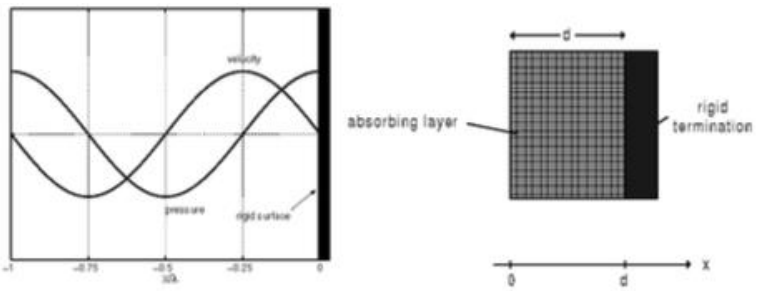


Figura 54 - Ampiezza della velocità vibrazionale

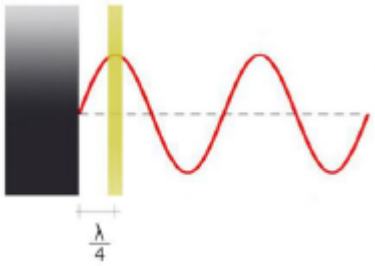
$$\Longrightarrow \tilde{\Delta}v_{0,\omega} = -\frac{1}{i\rho_0\omega}\frac{d\tilde{\Delta}p_{0,\omega}}{dx} = e^{i\frac{\pi}{2}}\frac{2A}{\rho_0 c}e^{i\phi_A}\sin\left(2\pi\frac{x}{\lambda}\right) = \frac{2A}{\rho_0 c}\sin\left(2\pi\frac{x}{\lambda}\right)e^{i\left(\phi_A-\frac{\pi}{2}\right)}$$

L'ampiezza della velocità vibrazionale è un'onda costante che presenta uno scostamento di fase di *-π/2* rispetto all'ampiezza di pressione sonora dell'onda costante.

L'ampiezza massima della velocità vibrazionale è

$$\left[\Delta v_{0,\omega}\right]_{max} = \frac{2A}{\rho_0 c}\sin\pi = \frac{2A}{\rho_0 c} \qquad \text{per} \quad \frac{x}{\lambda} = \frac{1}{4} = 0{,}25 \Rightarrow x = \frac{\lambda}{4} \tag{59}$$

Quindi la massima dissipazione (assorbimento) si verifica se tale massimo coincide con il materiale poroso posizionato sulla parete rigida di riflessione; questo significa che per raggiungere la miglior prestazione di assorbimento, per una determinata lunghezza d'onda (frequenza), deve risultare:



$$d > \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4\nu} \tag{60}$$

Per evitare di usare pannelli troppo sottili per l'assorbimento delle onde sonore alle basse frequenze, e per avere comunque una velocità vibrazionale sufficientemente alta all'interno del materiale assorbente, può essere predisposta un'intercapedine d'aria fra la parete retrostante del pannello e la parete rigida (Figura 55).

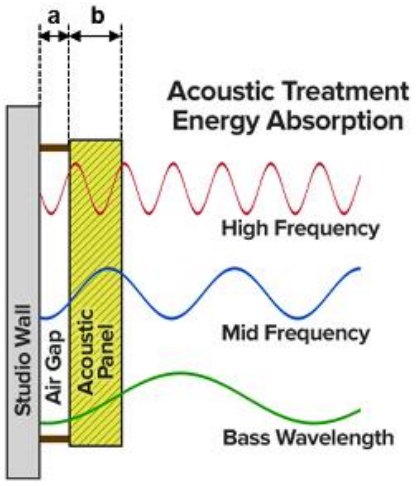


Figura 55 - Inserimento di un'intercapedine d'aria fra il pannello e la parete

$$d = a + b > \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4\nu} \tag{61}$$

In altre parole, l'assorbimento dell'energia sonora è più alto quando l'interazione con il materiale avviene dove la velocità delle particelle è massima, cioè $\lambda/4$ (e.g. a 500 Hz: $\lambda \approx$ 70 cm ⇒ 70/4 ≈ 17 cm).

Per questa ragione aumentando l'intercapedine d'aria fra la parete o il soffitto e l'assorbitore, si aumenta sensibilmente l'assorbimento delle medio-basse frequenze.

5.2. Assorbitori risonanti

Helmholtz immaginò che l'aria dentro ad un contenitore fosse assimilabile ad un sistema molla-massa. L'aria si comporta come una molla, il contenitore è la massa (Figura 56).

Quando il tappo d'aria nel collo va verso l'interno del contenitore, l'aria contenuta al suo interno si comprime e spinge fuori il tappo d'aria del collo.

L'attrito del flusso d'aria, nel momento in cui questa ritorna dentro al collo, è rappresentato da uno smorzatore viscoso.

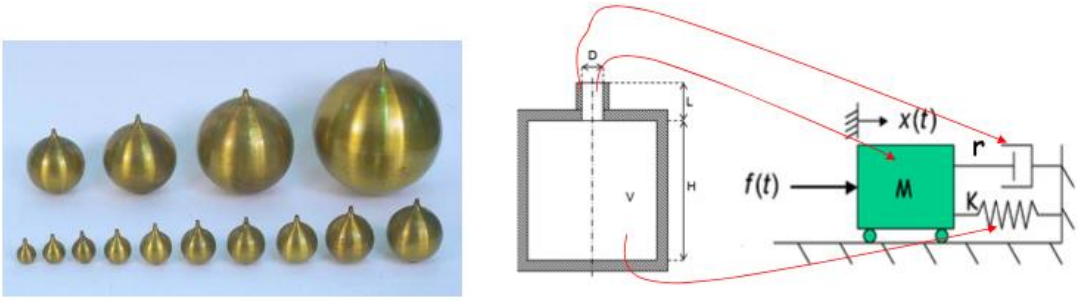


Figura 56 - Risuonatori di Helmholtz: sistema molla-massa per gli assorbitori risonanti

La dissipazione (e.g. l'assorbimento sonoro), proporzionale al quadrato della velocità, raggiunge il massimo nella *condizione di risonanza* $\omega = \omega_n$.

La frequenza di risonanza è individuata dalla formula:

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi}\sqrt{\frac{S}{V l_e}} \qquad (62)$$

con:

$l_e = l + 1{,}7 r_o$ flangiato

$l_e = l + 1{,}7 r_o$ non flangiato

Più è piccolo il diametro del collo del contenitore, più l'assorbimento sarà rivolto verso le alte frequenze, ma con un coefficiente α minore (Figura 57).

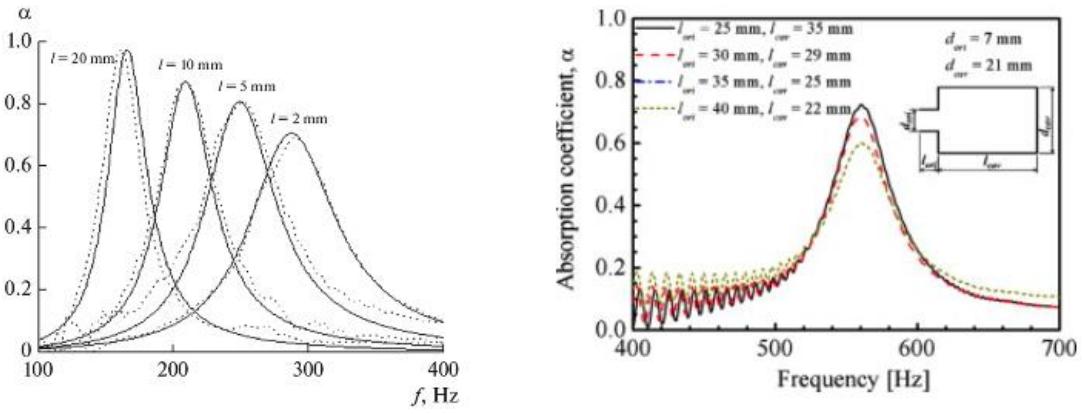


Figura 57 - Risuonatori di Helmholtz: assorbimento in frequenza in funzione della geometria dei risuonatori

Se si inserisce una cavità d'aria dietro il pannello perforato, si può notare come più risonatori di Helmholtz messi in parallelo comportino alcune interferenze fra le loro curve (Figura 58).

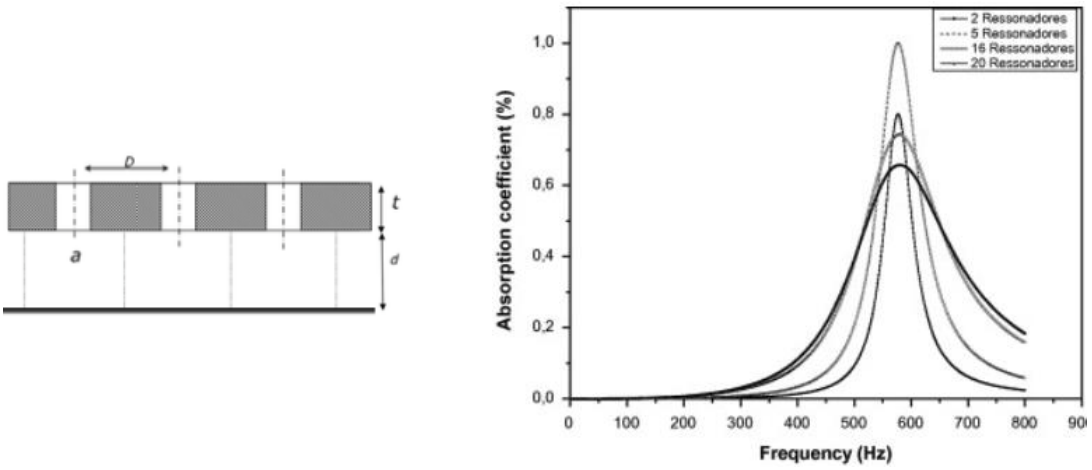


Figura 58 - Risuonatori a cavità

5.3. Assorbitori risonanti con materiale poroso

Una soluzione tecnologica prevede l'insieme di un pannello perforato con del materiale fonoassorbente. Aumentando la dissipazione interna del sistema, è possibile incrementare sia il picco di assorbimento che la frequenza di banda (qualità di picco), mentre la frequenza di risonanza rimane invariata.

Il materiale fonoassorbente può essere posizionato a contatto con il pannello perforato (Figura 59) oppure a contatto con la superficie retrostante il pannello (Figura 60), restituendo differenti capacità di assorbimento.

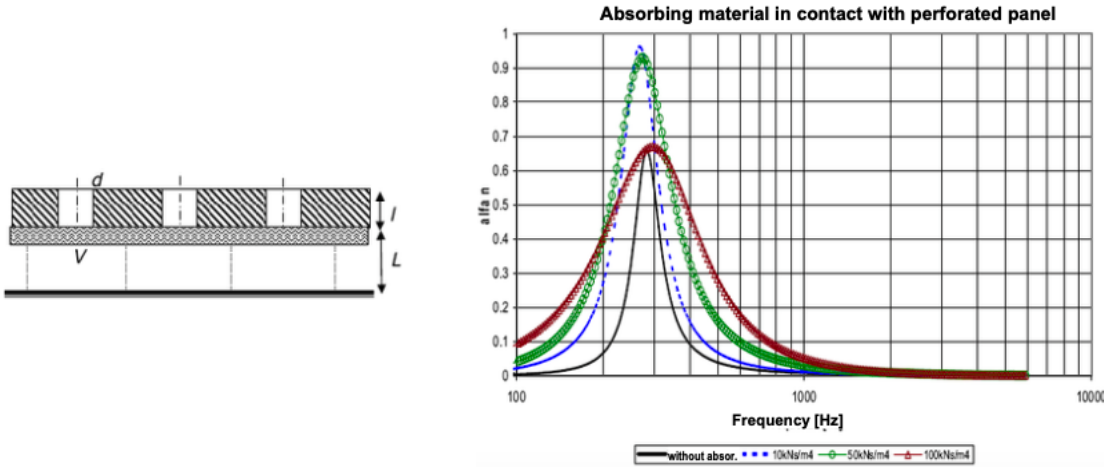


Figura 59 - Materiale fonoassorbente a contatto con il pannello forato

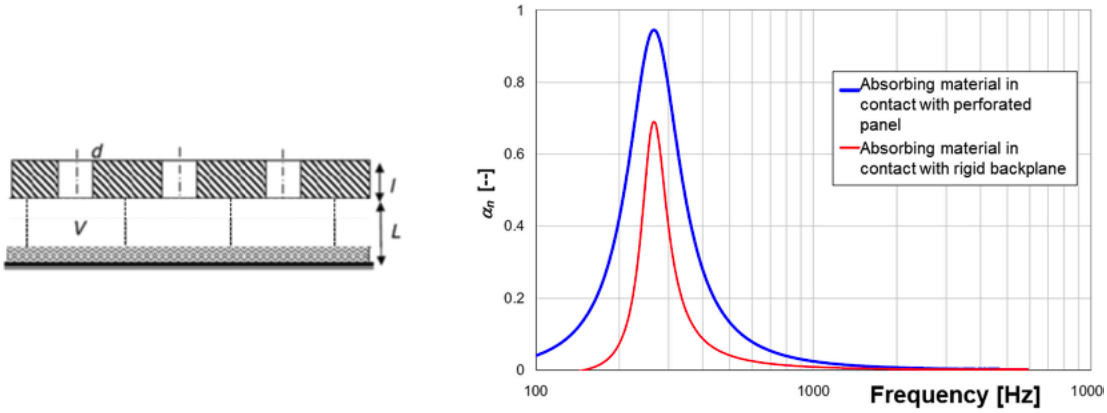


Figura 60 - Materiale fonoassorbente a contatto con la superficie retrostante il pannello

5.4. Assorbitori a membrana

Nella gamma delle basse frequenze, risulta necessario considerare altri tipi di assorbitori, in particolare quelli a membrana, o pannelli vibranti, che sono veri e propri assorbitori dei bassi.

Costituiscono un importante gruppo di assorbitori per varie ragioni, ma vengono spesso trascurati, forse perché non sembrano in grado di assorbire il suono.

Fondamentalmente, un assorbitore a membrana è una scatola piana, profonda 10-20 cm, applicata alla parete tramite un sottile foglio di compensato, o simile, alla parete frontale, e con una leggera lana minerale che riempie la cavità della scatola. L'introduzione del materiale fibroso serve a smorzare ulteriormente il sistema, ampliando lo spettro di

frequenza interessato dall'assorbimento acustico; in questo modo viene ridotta la reirradiazione in ambiente.

Se si percuote con la mano il pannello frontale, si percepisce un tono basso, un po' come quello di una grancassa, anche se più debole. Il tono che si genera è la frequenza di risonanza del sistema oscillante costituito dal pannello frontale con una certa massa combinato con la molla che rappresenta l'aria compressa.

La frequenza di risonanza è inoltre la frequenza alla quale la membrana assorbe, poiché l'energia sonora fa oscillare la membrana. Questa frequenza diminuisce con l'aumentare della densità superficiale del pannello e della profondità dell'itercapedine d'aria tra pannello e superficie rigida.

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi}\sqrt{\frac{\rho_{cav}}{m'd}} \tag{63}$$

In altre parole, si verifica una trasformazione dell'energia, ma questa volta da energia sonora a energia meccanica oscillatoria. Pertanto, la prima caratteristica significativa degli assorbitori a membrana è che assorbe l'energia sonora alle basse frequenze.

Anche gli assorbitori a membrana o a pannello sono sistemi massa-molla (Figura 61). Questa volta però la massa vibrante non è l'aria nel collo della bottiglia come nei risonatori di Helmholtz, ma è una membrana flessibile o piana e la molla è la cedevolezza della cavità d'aria sigillata della scatola che sostiene la membrana.

Le onde acustiche ad alta pressione che incontrano la superficie di una membrana la fanno oscillare ad una frequenza governata dalla massa e dalla rigidità della molla-aria contenuta nella cavità.

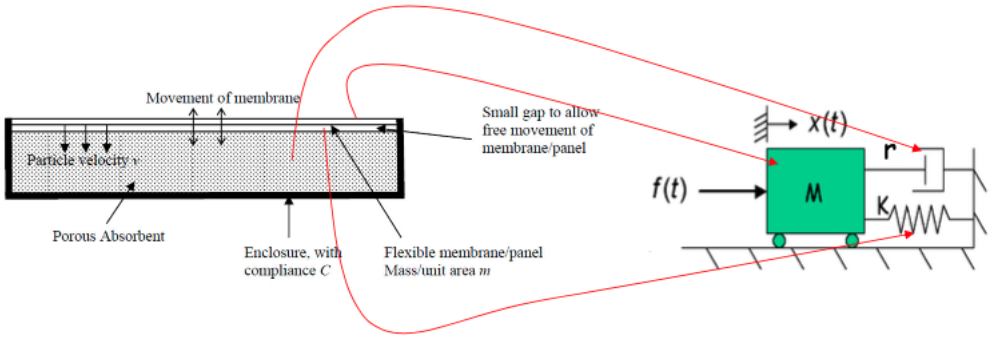


Figura 61 - Sistema molla-massa per gli assorbitori a membrana

La vibrazione della membrana crea alte velocità delle particelle nella parte posteriore che costringono l'aria ad andare attraverso il materiale poroso generando così alti livelli di assorbimento.

Gli assorbitori a membrana possono essere disposti con o senza materiali porosi posizionati sul retro e funzionano bene principalmente per le basse frequenze (per questo motivo vengono chiamati "trappole per bassi"); di solito vengono applicati agli angoli di un ambiente.

Nel grafico di Figura 62 viene mostrato un confronto fra le prestazioni in frequenza di assorbitori angolari con diverse densità di massa e posizionati a 3 pollici (7,62 cm) dalla parete.

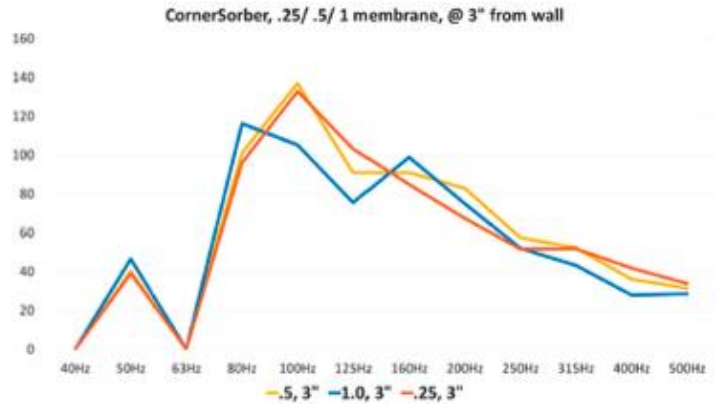


Figura 62 - Efficienza di assorbitori d'angolo con diverse densità di massa

6. Caso studio

Viene preso adesso in esame un caso studio. Si tratta di un ambiente contenuto all'interno di un edificio con destinazione d'uso uffici in Via Ramiro Fabiani 1 a San Donato Milanese (MI), nuova sede di A.T.M. S.p.A., l'Azienda Trasporti Milanesi, per la quale lavoro.

6.1. Inquadramento e descrizione dell'ambiente

La sede di ATM di Fabiani si trova a San Donato Milanese, Comune della zona sud-est di Milano, in un'area prevalentemente commerciale, con prevalenza di edifici ad uso ufficio.

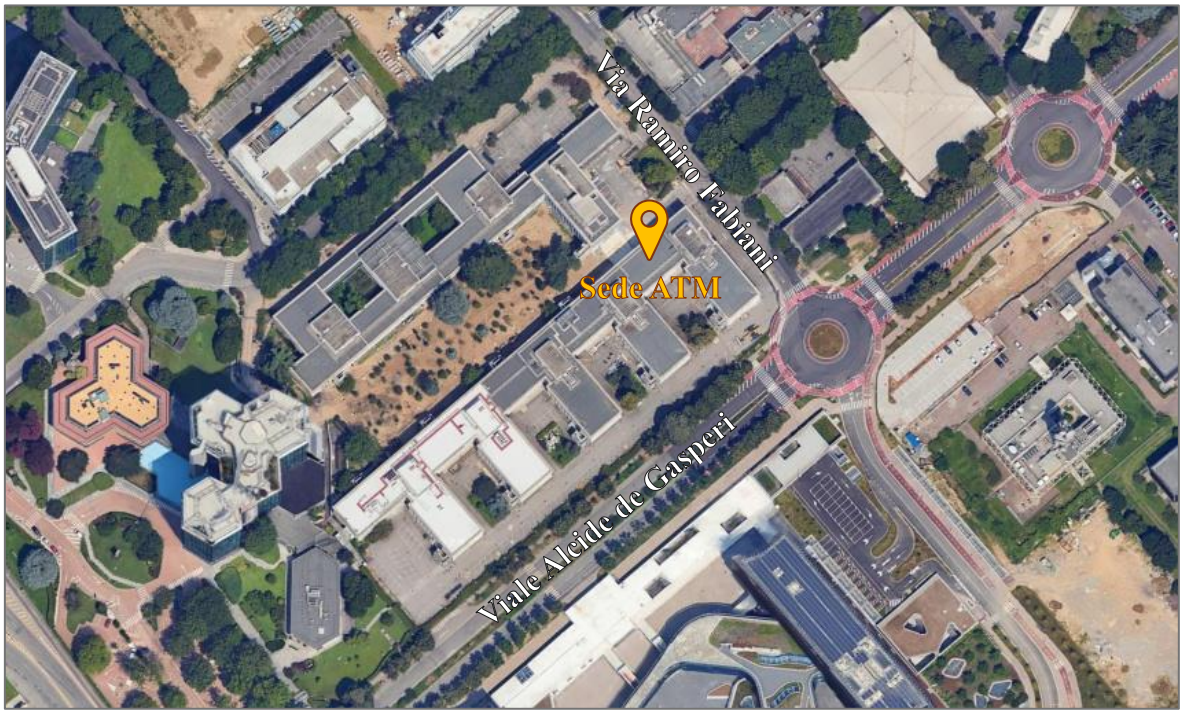


Figura 63 - Inquadramento dell'area

Gli spazi aziendali si trovano su più piani nelle palazzine D ed E, facenti parte di un complesso edilizio più ampio (5 palazzine collegate in lunghezza fra loro). Ogni palazzina è costituita da 3 piani fuori terra (Piano Terra, Primo e Secondo Piano), distribuita su una pianta ad "L" (Figura 63).

Si riportano nelle figure seguenti le piante relative agli spazi di pertinenza dell'Azienda.

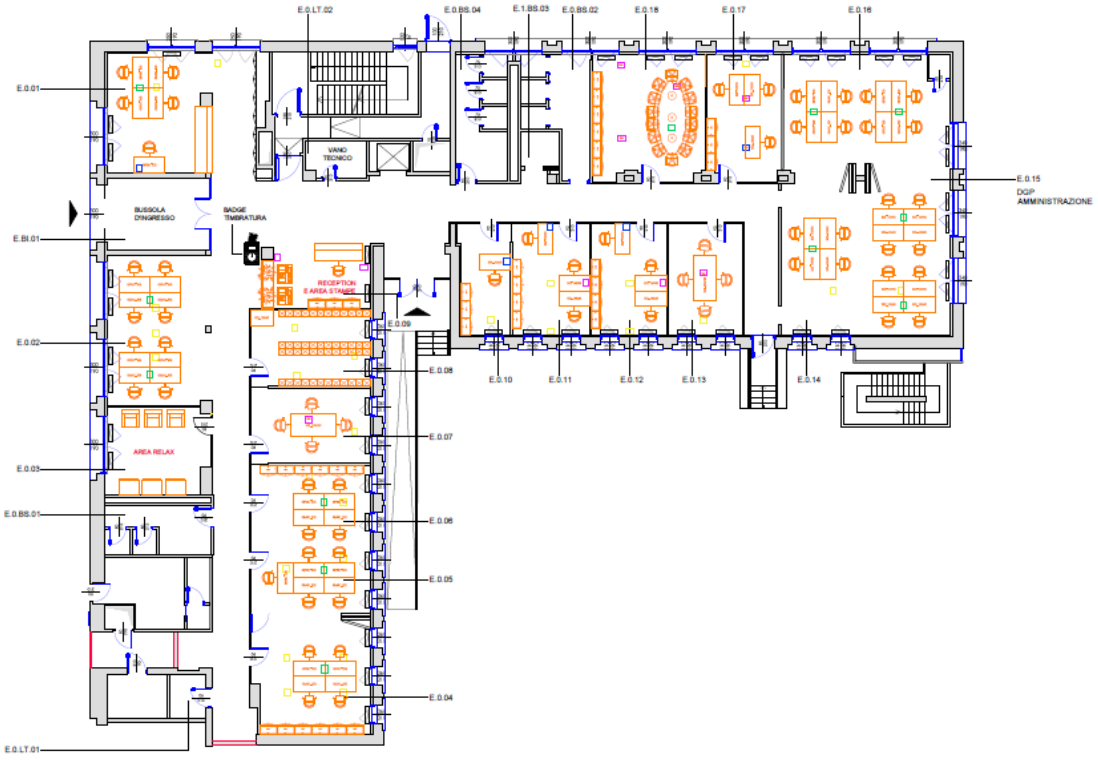


Figura 64 - Pianta Piano Terra, Palazzina E

Figura 65 - Pianta Piano Primo, Palazzina E

Figura 66 - Pianta Piano Secondo, Palazzina E

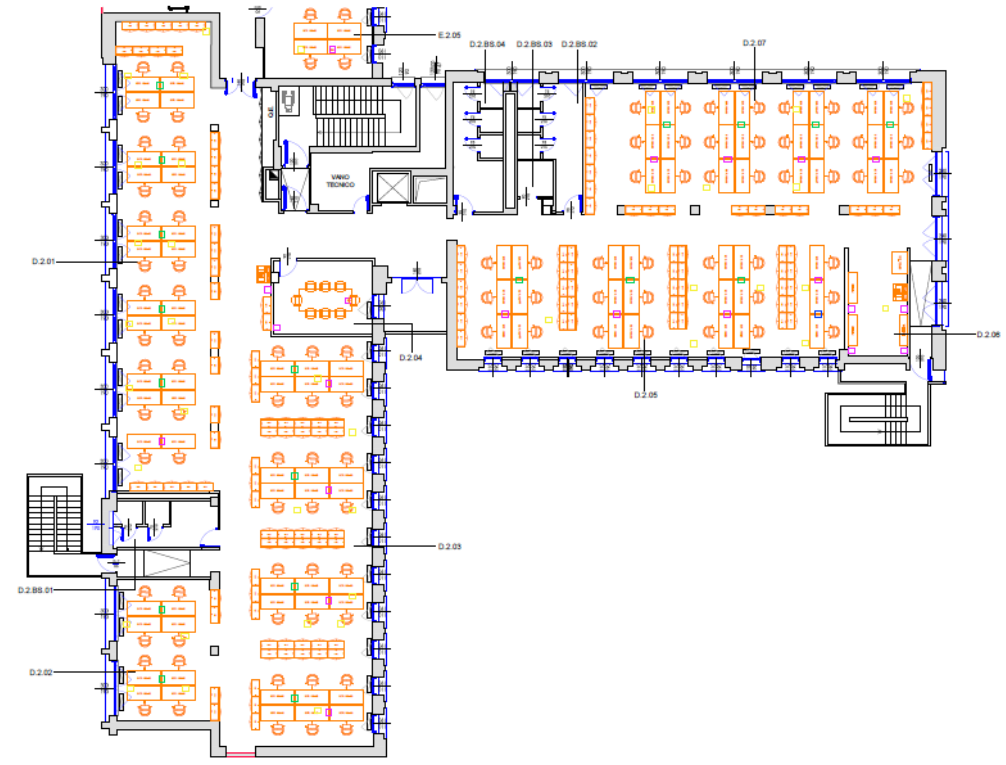


Figura 67 - Pianta Piano Secondo, Palazzina D

L'ambiente individuato per tutte le valutazioni sulla qualità acustica si trova al Piano Terra della Palazzina E (Figura 68). La scelta è dovuta a diversi fattori:

i. fra tutti quelli definibili *open-space*, questo ufficio è uno dei più ampi e quindi con una occupazione rilevante delle postazioni di lavoro;
ii. dati il volume regolare, la presenza di materiali poco fonoassorbenti allo stato dell'arte e, per quello che è presente, una distribuzione piuttosto uniforme dell'assorbimento, l'ambiente può essere definito *sabiniano*; le formule e le elaborazioni dei software vengono considerate maggiormente affidabili;
iii. come già indicato dalla numerazione in pianta, l'ambiente può essere inteso o come diviso (15 e 16), chiudendo la parete mobile posta al centro della stanza, oppure come ambiente unico (15 + 16), tenendo aperta la parete mobile; in questo modo risulta interessante condurre le valutazioni in entrambe le casistiche.

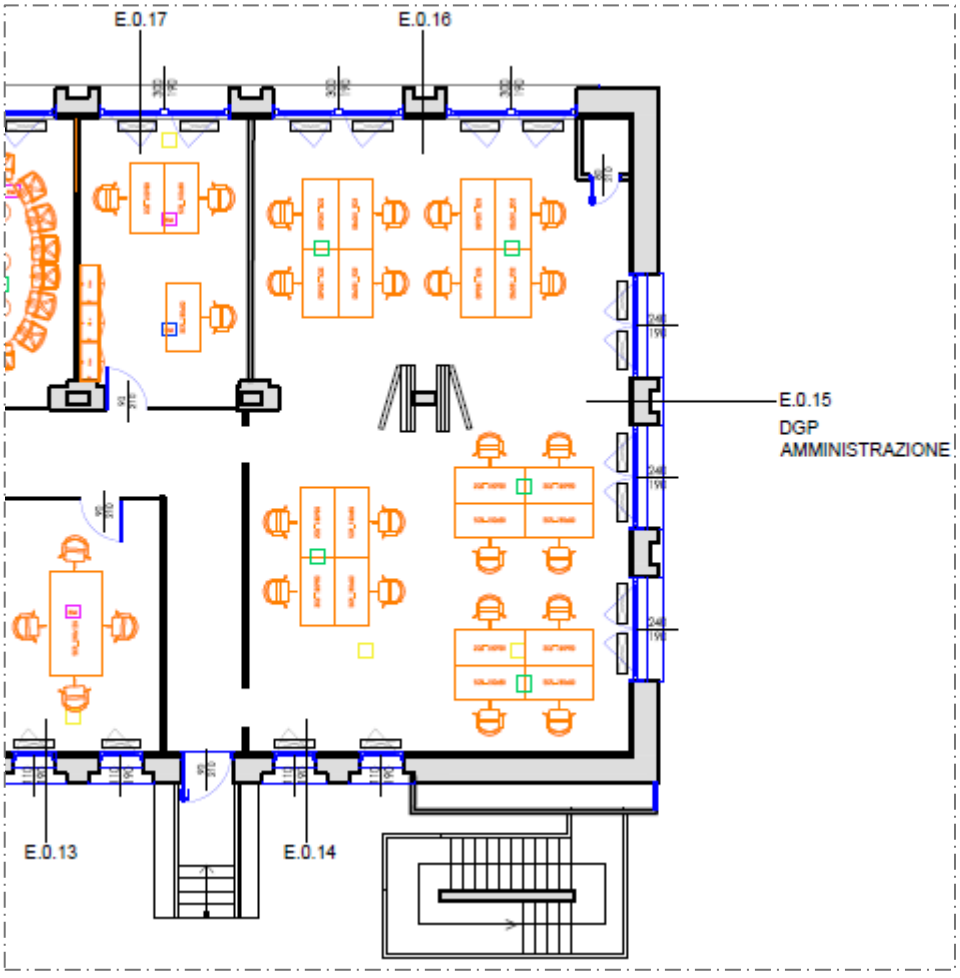


Figura 68 - Uffici 15 e 16, Palazzina E, Piano Terra

Il locale, esposto a sud-est sul lato lungo, presenta le seguenti superfici interne:

- un pavimento in linoleum di circa 127,41 m^2;
- pareti (perimetrali e divisorie) e soffitto (intradosso) con intonaco liscio;
- 2 finestre 3,00 x 1,90 m, 2 finestre 2,40 x 1,90 m, 2 finestre 0,90 x 2,10 m e due porte in legno laccato da 0,80 x 2,10 m;
- la parete divisoria mobile, in legno laccato, lunga quanto il lato corto del rettangolo di pianta, circa 7,60 m.

Come elementi di arredo si trovano:

- 20 scrivanie in legno laccato di dimensioni 1,60 x 0,80 m;
- 20 sedie da ufficio imbottite;
- 12 armadietti in legno laccato di dimensioni 0,90 x 0,20 x 1,0 m;
- oggettistica varia legata alle attività svolte.

Considerata un'altezza di 2,70 m, il volume totale dell'ambiente (15 + 16), con parete mobile aperta, è di circa 344,01 m^3.

Se invece considerassimo la parete chiusa, l'ufficio 15 ha un volume pari a 193,51 m^3, l'ufficio 16 di 150,50 m^3.

Dal punto di vista impiantistico, l'illuminazione, è soddisfatta con 8 lampade a neon quadrate a soffitto di dimensioni 60 x 60 cm, l'aerazione è invece gestita tramite bocchette di mandata e ripresa (le superfici finestrate non sono apribili).

Tendenzialmente, l'occupazione delle postazioni di lavoro, durante la giornata lavorativa, raggiunge sempre la massima capacità (20 persone).

6.2. Strumentazione utilizzata

L'elaborazione dei dati e lo svolgimento dei calcoli sono stati effettuati tramite il software di disegno *AutoCAD* (*Autodesk*), fogli di calcolo *Excel* (*Microsoft*), i software di elaborazione *SuoNus* (*ACCA*) ed Echo (*Tep*).

6.3. Condizione *pre operam*

Si passa adesso a valutare le grandezze acustiche più rappresentative per ambienti con destinazione d'uso "uffici".

Come premessa va riportato che la sede di ATM presa in considerazione, non è stata ancora completamente ultimata, pertanto non è stato possibile effettuare misure *in situ*.

Di conseguenza, le elaborazioni vengono svolte tramite metodi di calcolo previsionali, non identificativi come una misura fonometrica, ma certamente rappresentativi ed affidabili.

Inoltre, ogni valutazione verrà portata avanti considerando le condizioni di volume intero o volumi separati.

6.3.1. Tempo di riverberazione T_{60} – Pre

Si procede ricreando il più fedelmente possibile l'ambiente reale tramite i software di elaborazione, in modo da ottenere un tempo di riverberazione relativo allo stato di fatto.

Seguendo la norma UNI 11532, l'ambiente è stato ricreato computando le superfici e i numeri degli elementi in funzione del materiale e quindi dei suoi coefficienti di assorbimento α. I dettagli numerici sono riportati in Tabella 16, considerando nella colonna Area/Numero il numero complessivo per la condizione 15 + 16, i numeri fra parentesi rispettivamente per la quota parte del contributo di 15 e del contributo di 16:

Pre operam							
Elemento	Area/Numero	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Pavimento in linoleum	127,41 m^2 (71,67 + 55,74)	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03
Intonaco liscio (pareti e soffitto)	223,30 m^2 (123,95 + 101,68)	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06
Vetro (finestre)	29,26 m^2 (13,30 + 15,96)	0,12	0,08	0,05	0,04	0,03	0,02
Legno laccato (porte, scrivanie, armadietti)	8,95 (28,22 e 26,11 Contributo porta mobile)	0,14	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08

Sedia da ufficio imbottita	20 (8 + 12)	0,10	0,20	0,25	0,30	0,35	0,35

Tabella 16 - Elementi fonoassorbenti condizione *pre*

Inoltre, i calcoli sono stati svolti considerando le condizioni ambientali di temperatura dell'aria a 20 °C con un'umidità relativa compresa fra il 50 ed il 70 %, restituendo così un'area totale di assorbimento dell'aria, in frequenza (Tabella 17):

A	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
air	0,14	0,41	0,82	1,36	2,31	5,58

Tabella 17 - Area totale di assorbimento dell'area

Tramite i software di elaborazione si ricavano i valori di T_{60} in banda d'ottava per le frequenze da 125 a 4000 Hz:

Condizione	Tempo di riverberazione T_{60} - *Pre*						
ufficio	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Avg
15 + 16	1,64	1,90	1,79	1,72	1,43	1,16	1,61
15	1,55	1,80	1,71	1,64	1,37	1,12	1,53
16	1,44	1,72	1,66	1,61	1,35	1,11	1,48

Tabella 18 – $T_{60,f,pre}$

I risultati ottenuti vanno adesso confrontati con i valori indicati nelle normative di riferimento. Tenendo conto che non esistono limite di legge per la destinazione d'uso "uffici", si provvede ad un confronto con i limiti riportati nelle varie normative. Anche quando non è presente un valore per la destinazione d'uso in esame, si estende il confronto con altre, o per analogia o per riferimento da cui scostarsi.

UNI 11367:2010 – Appendice C Ambiente adibito ad ascolto del parlato ($50 \leq V \leq 2000$ m^3) – Ambiente non occupato			
Condizione	15 + 16	15	16
T_{ott}	0,84	0,76	0,73
T_{max}	1,01	0,91	0,87
ISO 22955:2020 Spazio di tipologia 4: attività basate in piccola parte su lavoro collaborativo Per spazi di tipologia 1 (attività non ancora cosciuta) e 6 (combinazione di attività nello stesso ambiente): $A/S_{floor} \geq 9$			
Condizione	15 + 16	15	16
$T_{R,125\ Hz} \leq 0{,}8$ s	1,64	1,55	1,44
$T_{R,avg\ 250\text{-}4000\ Hz} \leq 0{,}5$ s	1,60	1,53	1,49
A/S_{floor}	0,3	0,5	0,7
DPCM 5-12-1997 Aule scolastiche (utilizzato per calcolo valore medio rappresentativo)			
Condizione	15 + 16	15	16
$T_{R,avg\ 250\text{-}2000\ Hz} \leq 1{,}2$ s	1,71	1,63	1,59

Tabella 19 - $T_{60,pre}$

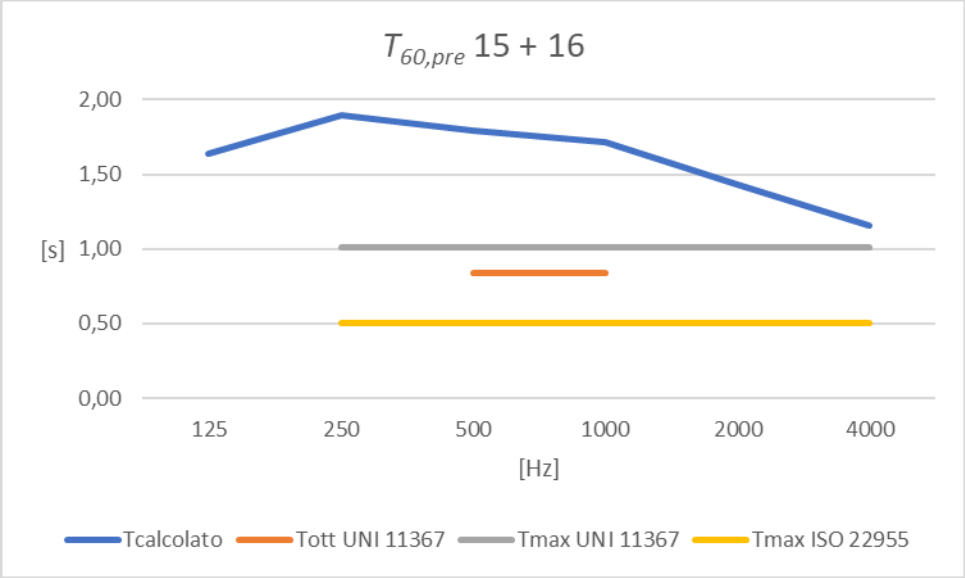


Grafico 1 - $T_{60,pre}$ 15 + 16

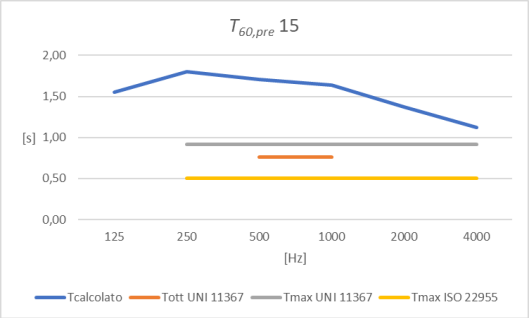


Grafico 2 - $T_{60,pre}$ 15

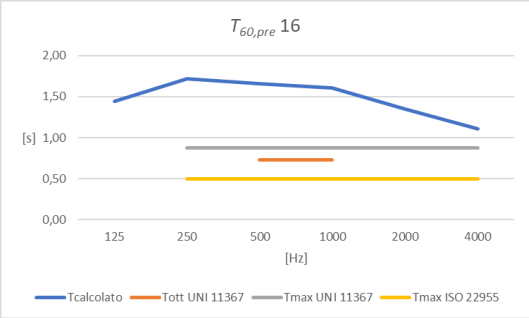


Grafico 3 - $T_{60,pre}$ 16

Nei grafici, ottenuti dai risultati riportati nelle tabelle di questo paragrafo, si nota come la linea spezzata in blu, che identifica il $T_{60,avg,125\text{-}4000\ Hz}$ calcolato, sia ancora lontana dalle linee orizzontali, che indicano invece i tempi di riverberazione di riferimento.

Si tratta quindi di abbassare la linea nera in modo che coincida il più possibile con le linee in grigio, arancione e soprattutto gialla, nell'intervallo di frequenze che va dai 250 ai 4000 Hz ed in particolare alle medio-basse frequenze, quelle caratteristiche della voce umana.

Anche il rapporto fra area di assorbimento e superficie del pavimento rimane ben al di sotto del valore minimo indicato dalla norma.

6.3.2. Speech Transmission Index *STI* – Pre

Il calcolo per la determinazione dello *STI* può essere impostato seguendo l'algoritmo del *Metodo C – Campo riverberato diffuso e contributo del suono diretto*, in quanto le dimensioni non così ampie della stanza pongono il parlatore ad una distanza inferiore a quella critica rispetto all'ascoltatore, e seguendo lo schema di Figura 69, in cui vengono riportate le distanze rappresentative fra le postazioni di lavoro, quest'ultime intese come sorgenti e riceventi.

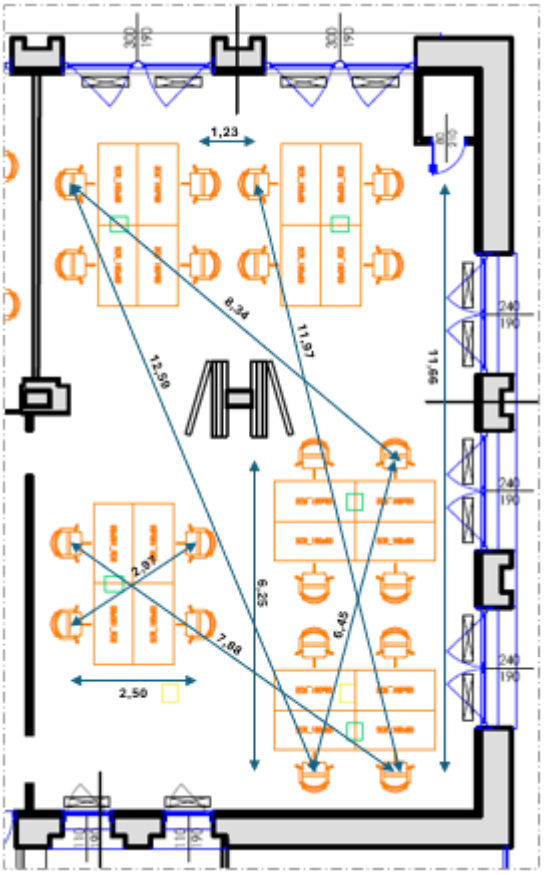


Figura 69 - Distanze rappresentative fra le postazioni di lavoro

La seguente Tabella 20 riporta i risultati dello *STI*, ottenuti in funzione delle varie distanze.

UNI 11367:2010 – Appendice C Ambiente adibito ad ascolto del parlato – Ambiente arredato con due persone al massimo Condizioni *STI* ≥ 0,6 ISO 3382-3:2012 Condizioni – Effetto negativo sulla prestazione lavorativa: Riduzione *STI* < 0,5 Scomparsa *STI* < 0,2 15 + 16	*STI*
r = 1,23 m	0,58
r = 2,50 m	0,46
r = 2,97 m	0,44
r = 6,25 m	0,41
r = 6,45 m	0,41
r = 7,88 m	0,41
r = 8,34 m	0,41
r = 11,66 m	0,41
r = 11,97 m	0,41

r = 12,59 m	0,41
avg	0,44
15	
r = 1,23 m	0,56
r = 2,50 m	0,50
r = 2,97 m	0,47
r = 6,25 m	0,46
r = 6,45 m	0,46
r = 7,88 m	0,46
avg	0,49
16	
r = 1,23 m	0,52
r = 2,50 m	0,46
r = 2,97 m	0,45
r = 6,25 m	0,45
r = 6,45 m	0,45
avg	0,47

Tabella 20 - STI_{pre}

Analizzando i valori, è possibile fare due osservazioni:

i. nessun numero raggiunge il valore minimo di 0,6 indicato dalla UNI 11367:2010 – Appendice C: questo però è un bene, perché un ufficio non è un auditorium, vale a dire che si ricerca la privacy, non l'intelligibilità di chi parla;
ii. quasi tutti i valori sono inferiori almeno allo 0,5 indicato dalla ISO 3382-3:2012: infatti questa norma ricerca proprio il "non coinvolgimento uditivo" da parte degli occupanti dell'ufficio; valori prossimi allo 0,2 sono però lontani.

Interessante è poi la distribuzione quasi costante dei valori di *STI* calcolato, cioè come evidentemente il metodo di calcolo proposto dalla norma fornisca risultati piuttosto omogenei per ogni zona di un ambiente (seppur di geometrie non eccessive, in questo caso).

6.3.3. Indice di Chiarezza C_{50} – Pre

Viene calcolato adesso l'indice di chiarezza C_{50} con entrambe le formule (Metodo approssimativo e Metodo puntuale) fornite dalla UNI 11532-1:2018. Le distanze inserite nel

calcolo seguono lo stesso schema utilizzato per la determinazione dello *STI*; i tempi di riverberazione sono quelli ricavati per la fase *pre*. I risultati sono espressi in Tabella 21.

UNI 11367:2010 – Appendice C Ambiente adibito ad ascolto del parlato – Ambiente arredato con due persone al massimo							
C_{50} [dB]	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	avg
Meth app	-2,8	-3,6	-3,3	-3,1	-2,1	-0,9	-3,2
Meth punt							-2,5
r = 1,23 m	0,9	0,0	0,4	0,6	1,7	3,0	0,5
r = 2,50 m	-1,6	-2,4	-2,0	-1,8	-0,8	0,5	-1,9
r = 2,97 m	-1,9	-2,7	-2,4	-2,1	-1,1	0,1	-2,2
r = 6,25 m	-2,6	-3,3	-3,0	-2,8	-1,8	-0,6	-2,9
r = 6,45 m	-2,6	-3,4	-3,0	-2,8	-1,8	-0,6	-2,9
r = 7,88 m	-2,6	-3,4	-3,1	-2,9	-1,9	-0,7	-3,0
r = 8,34 m	-2,7	-3,4	-3,1	-2,9	-1,9	-0,7	-3,0
r = 11,66 m	-2,7	-3,5	-3,2	-3,0	-2,0	-0,8	-3,1
r = 11,97 m	-2,7	-3,5	-3,2	-3,0	-2,0	-0,8	-3,1
r = 12,59 m	-2,7	-3,5	-3,2	-3,0	-2,0	-0,8	-3,1
15							
C_{50} [dB]	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	avg
Meth app	-2,5	-3,3	-3,0	-2,8	-1,8	-0,7	-2,9
Meth punt							-2,2
r = 1,23 m	-0,1	-0,9	-0,6	-0,4	0,7	1,9	-0,5
r = 2,50 m	-1,7	-2,6	-2,3	-2,1	-1,1	0,1	-2,2
r = 2,97 m	-2,0	-2,8	-2,5	-2,3	-1,3	-0,1	-2,4
r = 6,25 m	-2,4	-3,2	-2,9	-2,7	-1,7	-0,5	-2,8
r = 6,45 m	-2,4	-3,2	-2,9	-2,7	-1,7	-0,5	-2,8
r = 7,88 m	-2,4	-3,2	-2,9	-2,7	-1,7	-0,6	-2,8
16							
C_{50} [dB]	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	avg
Meth app	-2,1	-3,1	-2,9	-2,7	-1,7	-0,6	-2,8
Meth punt							-2,1
r = 1,23 m	-0,1	-1,1	-0,9	-0,7	0,3	1,5	-0,8
r = 2,50 m	-1,5	-2,5	-2,3	-2,1	-1,1	0,0	-2,2
r = 2,97 m	-1,7	-2,6	-2,4	-2,3	-1,3	-0,2	-2,4
r = 6,25 m	-2,0	-3,0	-2,8	-2,6	-1,6	-0,5	-2,7
r = 6,45 m	-2,0	-3,0	-2,8	-2,6	-1,6	-0,5	-2,7

Tabella 21 - $C_{50,pre}$

Anche per questo parametro, il valore minimo di 0 indicato dalla UNI 11367:2010 – Appendice C è il riferimento da cui scostarsi: non serve chiarezza del parlato fra le scrivanie

di un ufficio in cui solo in piccola parte le attività sono basate su lavoro collettivo. I numeri ottenuti rispecchiano questo criterio.

6.3.4. Indice di attenuazione spaziale del livello sonoro ponderato A del parlato al raddoppio della distanza dalla sorgente $D_{2,S}$ – Pre

Un primo tentativo per la determinazione dell'indice di attenuazione spaziale viene svolto inserendo degli schermi fra le postazioni di lavoro frontali con un'altezza di 1,2 m, misura che facilmente si trova in commercio.

ISO 3382-3:2012			
Prestazioni acustiche per compiti che richiedono concentrazione e competenze cognitive			
Condizioni	Scarse o insufficienti $D_{2,S} < 5$ dB		Buone $D_{2,S} \geq 7$ dB
ISO 2295:2020			
Spazio di tipologia 4: attività basate in piccola parte su lavoro collaborativo			
Condizione	$D_{2,S} \geq 7$ dB		
$D_{2,S}$	15 + 16	15	16
[dB]	4,7	4,3	4,4

Tabella 22 - $D_{2,s,pre}$

Si nota che i risultati corrispondono a condizioni acustiche scarse o insufficienti, anche considerando l'incertezza di 0,5 ÷ 1,5 dB dovuta al carattere previsionale della formula.

6.3.5. Livello sonoro ponderato A del discorso parlato normale a 4 m dalla sorgente $L_{p,A,S,4m}$ – Pre

Considerando gli stessi schermi di altezza 1,2 m, si ricavano i primi risultati per il Livello del parlato a 4 m.

ISO 3382-3:2012			
Prestazioni acustiche per compiti che richiedono concentrazione e competenze cognitive			
Condizioni	Scarse o insufficienti $L_{p,A,S,4m} > 50$ dB	Buone $L_{p,A,S,4m} \leq 48$ dB	
ISO 2295:2020			
Spazio di tipologia 4: attività basate in piccola parte su lavoro collaborativo			
Condizione	$L_{p,A,S,4m} \leq 47$ dB		
$L_{p,S,A,4m}$	15 + 16	15	16

[dB]	52,7	52,7	52,9

Tabella 23 - $L_{p,A,s,4m,pre}$

Anche in questo caso, si nota che i risultati corrispondono a condizioni acustiche scarse o insufficienti, anche considerando l'incertezza di 1,0 ÷ 2,8 dB dovuta al carattere previsionale della formula.

6.3.6. Distanza di distrazione r_D – Pre

La Distanza di distrazione che si riscontra prima dell'intervento di correzione acustica dell'ambiente viene determinata per tentativi fino a risalire al valore, in metri, tale per cui lo *STI* raggiunge valori inferiori a 0,5 prima, e inferiori a 0,2 poi, ricordando che minore è il valore dell'intelligibilità del parlato, maggiore sarà la produttività del lavoro.

ISO 3382-3:2012			
Prestazioni acustiche per compiti che richiedono concentrazione e competenze cognitive			
Condizioni	Scarse o insufficienti r_D > 10 m		Buone $r_D \leq 5$ m
[m]	15 + 16	15	16
r_D t.c. *STI* < 0,5	1,80	1,90	1,40
r_D t.c. *STI* < 0,2	impossibile	impossibile	impossibile

Tabella 24 - $r_{D,pre}$

Dall'analisi dei dati si osserva che:

i. valori di *STI* inferiori a 0,5 sono raggiunti con distanze che identificano condizioni acustiche già buone; c'è da dire però che lo stato attuale dell'ambiente prevede un tempo di riverberazione di certo non ottimale: migliorare (cioè abbassare) il tempo di riverberazione comporta necessariamente un miglioramento dello *STI* e quindi un innalzamento della Distanza di distrazione, che però deve assumere valori più bassi possibile;
ii. date le caratteristiche dell'ambiente (geometria e assorbimento acustico delle superfici), risulta impossibile raggiungere valori di *STI* inferiori a 0,2;
iii. i risultati ottenuti sono pertanto tutte distanze che restituiscono *STI* compresi fra 0,2 e 0,5.

6.4. Condizione *post operam*

Si procede adesso considerando diverse soluzioni tecnologiche, con la finalità di migliorare i parametri acustici, e quindi i livelli qualitativi dell'ambiente.

6.4.1. Tempo di riverberazione T_{60} – Post

In questa fase di progetto bisogna ricercare, scegliere ed inserire una certa quantità di elementi fonoassorbenti in modo da far diminuire il tempo di riverberazione, e di tutti quei parametri di cui questo ne è funzione.

Considerati gli obbiettivi del progetto e la tipologia dell'ambiente, si ricorre ad un sistema di assorbimento acustico per porosità, vale a dire pannelli fonoassorbenti.

Le geometrie e la disposizione di arredi ed impianti impongono un'accurata valutazione sulla disposizione di questi elementi, non tanto per "localizzazioni" dell'assorbimento (si può assumere che il tempo di riverberazione sia distribuito in maniera sostanzialmente uniforme), quanto per motivi di spazi fisici e comunque estetici.

Dalla ricerca effettuata sulle aziende di riferimento sul mercato per questo tipo di prodotti, si è scelto di applicare a parete pannelli rettangolari di dimensioni 0,7 x 1,0 m, 1,0 x 1,4 m e 1,4 x 2,0 m, disposti in verticale, e pannelli circolari con diametro 1,25 m a soffitto pendinati; entrambe le forme hanno spessore di circa 45 mm.

I pannelli rettangolari a parete vengono installati in aderenza tramite velcro, i pannelli a soffitto sono invece appesi con dei pendini metallici distanti circa 20 cm dalla finitura del controsoffitto; applicare con pendini, piuttosto che fissare in aderenza, permette di incrementare di circa il 25 % la superficie dei pannelli, e di conseguenza anche l'area di assorbimento.

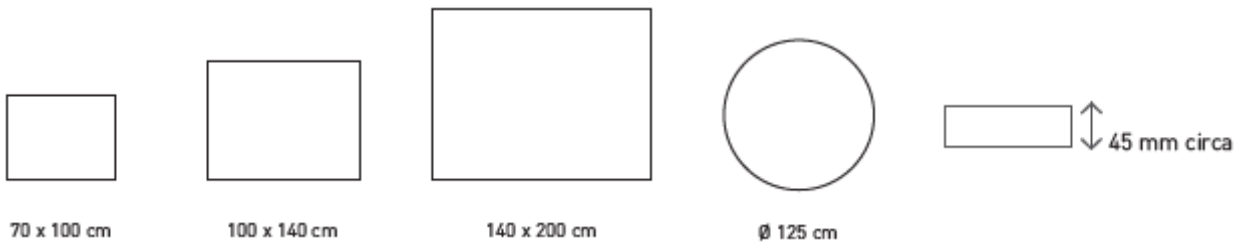


Figura 70 - Dimensioni dei pannelli fonoassorbenti

Come descrizione degli elementi scelti, si riporta la voce di capitolato presente nella scheda tecnica pubblicata sul sito dell'azienda produttrice:

Pannello fonoassorbente in fibra di poliestere ad elevato potere fonoassorbente e densità crescente lungo lo spessore. Densità del pannello a gradiente variabile di valor medio 40 kg/m^3, opportunamente calibrato per migliorare le prestazioni di assorbimento acustico. Spessore 45 mm, reazione al fuoco Euroclasse B-s2,d0 con omologazione ministeriale, colore bianco o nero.

I coefficienti di assorbimento sono ricavati da prove di laboratorio in camera riverberante secondo la UNI EN ISO 354:2003.

Inoltre, per dare una spinta maggiore alla funzione di fonoassorbimento, si è scelto di sostituire all'intonaco liscio del controsoffitto, un più performante intonaco con caratteristiche acustiche.

Basta, a questo punto, ribaltare la *Formula di Sabine* per trovare di quanti metri quadrati si necessita per arrivare a valori di tempi di riverberazione ottimali.

$$T_{60,pre} = \frac{0{,}16 \cdot V}{A_1} \quad \Rightarrow \quad T_{60,post} = \frac{0{,}16 \cdot V}{A_1 + \alpha_2 S_2} \quad \Rightarrow \quad \alpha_2 S_2 = \frac{0{,}16 \cdot V}{T_{60,post}} - A_1 \qquad (64)$$

Quindi, considerate le caratteristiche tecniche degli elementi, gli spazi disponibili all'interno dell'ambiente e gli accorgimenti per una buona progettazione, secondo lo schema di Figura 71 si è deciso di applicare:

- 6 pannelli circolari pendinati di diametro 1,25 m
- 4 pannelli rettangolari da 0,7 x 1,0 m
- 6 pannelli rettangolari da 1,0 x 1,4 m
- 8 pannelli rettangolari da 1,4 x 2,0 m

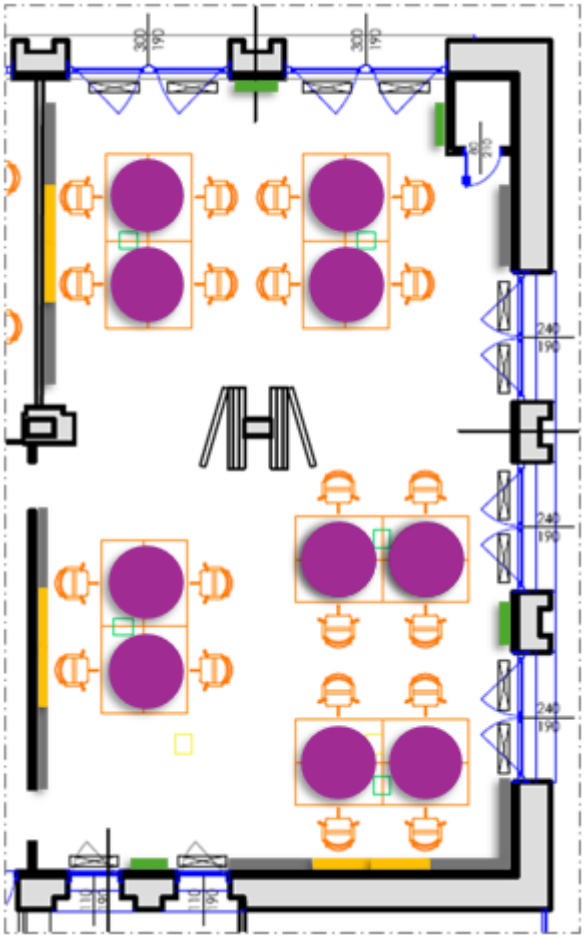


Figura 71 - Disposizione dei pannelli a parete e soffitto

I dettagli numerici utilizzati per il calcolo sono riportati nella Tabella 25 che segue:

Post operam							
Elemento	Area/Numero	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Pavimento in linoleum	127,41 m^2 (71,67 + 55,74)	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03
Intonaco liscio (pareti)	165,20 m^2 (88,25 + 79,28)	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06
Vetro (finestre)	29,26 m^2 (13,30 + 15,96)	0,12	0,08	0,05	0,04	0,03	0,02
Legno laccato (porte, scrivanie, armadietti)	8,95 (28,22 e 26,11 Contributo porta mobile)	0,14	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08
Sedia da ufficio imbottita	20 (8 + 12)	0,10	0,20	0,25	0,30	0,35	0,35

Intonaco acustico (soffitto)	127,41 m^2 (71,67 + 55,74)	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35
Pannelli fonoassorbenti	58,10 m^2 (35,70 + 22,40)	0,25	0,50	0,85	1,00	1,00	0,90

Tabella 25 - Elementi fonoassorbenti condizione *post*

Infine, tramite i software di elaborazione si ricavano i valori di T_{60} in banda d'ottava per le frequenze da 125 a 4000 Hz:

Condizione	Tempo di riverberazione T_{60} - *Post*						
ufficio	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	avg
15 + 16	0,96	0,75	0,55	0,47	0,43	0,41	0,60
15	0,91	0,70	0,52	0,44	0,41	0,39	0,56
16	0,91	0,75	0,56	0,49	0,44	0,42	0,60

Tabella 26 - $T_{60,f,post}$

Si ripropone adesso il confronto con i valori di riferimento indicati nelle normative e i grafici che risultano nella fase *post* del progetto.

UNI 11367:2010 – Appendice C Ambiente adibito ad ascolto del parlato ($50 \leq V \leq 2000$ m^3) – Ambiente non occupato			
Condizione	15 + 16	15	16
T_{ott}	0,84	0,76	0,73
T_{max}	1,01	0,91	0,87
ISO 22955:2020 Spazio di tipologia 4: attività basate in piccola parte su lavoro collaborativo Per spazi di tipologia 1 (attività non ancora cosciuta) e 6 (combinazione di attività nello stesso ambiente): $A/S_{floor} \geq 9$			
Condizione	15 + 16	15	16
$T_{R,125\ Hz} \leq 0,8$ s	0,92	0,91	0,91
$T_{R,avg\ 250\text{-}4000\ Hz} \leq 0,5$ s	0,52	0,49	0,53
A/S_{floor}	0,9	0,8	0,8
DPCM 5-12-1997 Aule scolastiche (utilizzato per calcolo valore medio rappresentativo)			
Condizione	15 + 16	15	16
$T_{R,avg\ 250\text{-}2000\ Hz} \leq 1,2$ s	0,55	0,52	0,56

Tabella 27 - $T_{60,post}$

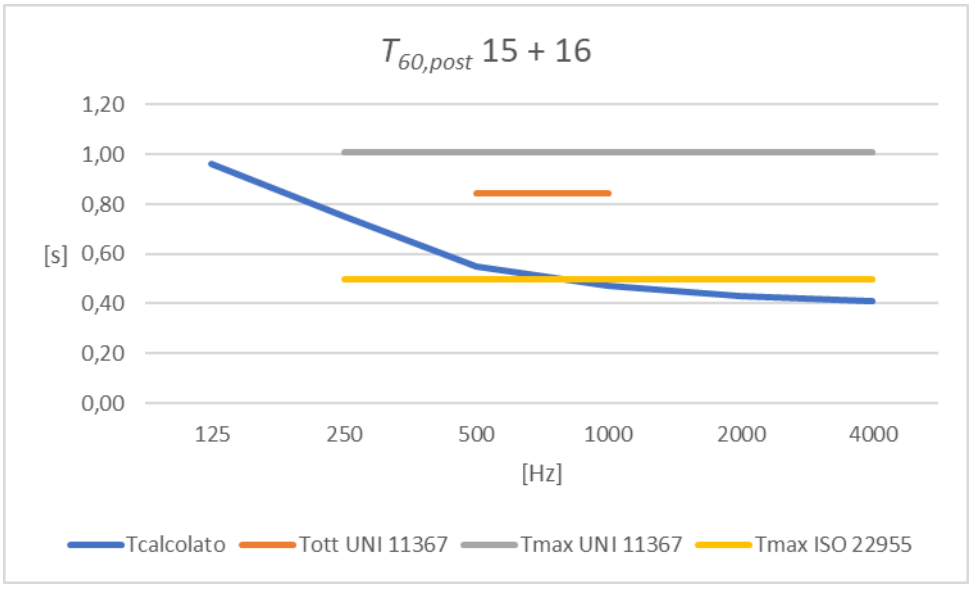


Grafico 4 - $T_{60,post}$ 15 + 16

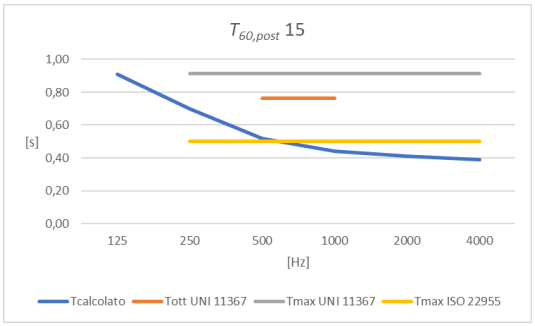


Grafico 5 - $T_{60,post}$ 15

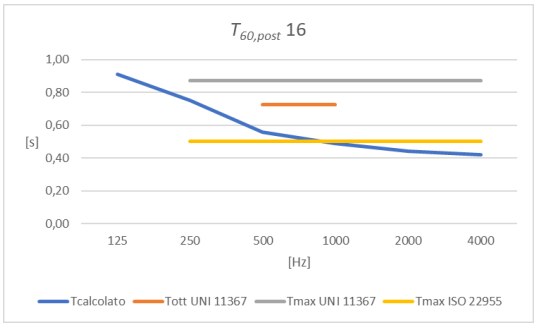


Grafico 6 - $T_{60,post}$ 16

Dalle curve rappresentate, si nota subito un evidente abbassamento della curva blu e perciò una forte riduzione dei tempi di riverberazione. La fascia di frequenze al di sopra dei 500 Hz si trova adesso sotto le linee dei tempi di riferimento indicati nella UNI 11367; non parte della fascia al di sotto dei 500 Hz, meno rilevante ai fini dell'intervento e comunque compensata nell'assorbimento acustico dalla precedente.

La media dei tempi fra i 250 e i 4000 Hz coincide perfettamente con il valore massimo indicato dalla ISO 2295:2020, un tempo di riverberazione davvero sfidante per ambienti con volumi di quest'ordine di grandezza.

Il rapporto area di assorbimento su superficie del pavimento assume ora valori concordanti con quelli minimi indicati dalla normativa.

È da tenere in considerazione, poi, che nella modellazione tramite software non si è tenuto conto di ulteriori elementi di arredo, oggettistica varia e persone presenti nell'ambiente, soprattutto nei giorni con il maggior numero di occupanti: questi ulteriori elementi contribuiscono notevolmente all'assorbimento di alcune frequenze.

6.4.2. Speech Transmission Index *STI* – Post

Seguendo lo stesso schema di distanze della fase *pre*, si procede al calcolo dello *STI* in seguito all'intervento svolto nell'ambiente. I risultati sono espressi in Tabella 28.

UNI 11367:2010 – Appendice C Ambiente adibito ad ascolto del parlato – Ambiente arredato con due persone al massimo Condizioni *STI* ≥ 0,6 ISO 3382-3:2012 Condizioni – Effetto negativo sulla prestazione lavorativa: Riduzione *STI* < 0,5 Scomparsa *STI* < 0,2	
15 + 16	*STI*
r = 1,23 m	0,72
r = 2,50 m	0,52
r = 2,97 m	0,49
r = 6,25 m	0,41
r = 6,45 m	0,41
r = 7,88 m	0,40
r = 8,34 m	0,40
r = 11,66 m	0,40
r = 11,97 m	0,40
r = 12,59 m	0,39
avg	0,45
15	
r = 1,23 m	0,72
r = 2,50 m	0,57
r = 2,97 m	0,55
r = 6,25 m	0,51
r = 6,45 m	0,51
r = 7,88 m	0,50
avg	0,56
16	
r = 1,23 m	0,71
r = 2,50 m	0,59
r = 2,97 m	0,58
r = 6,25 m	0,55
r = 6,45 m	0,55

avg	0,60

Tabella 28 - STI_{post}

Risulta subito evidente come, riducendo il tempo di riverberazione, aumenti l'intelligibilità al parlato: la stessa intelligibilità può essere percepita allontanandosi un po' dalla sorgente. Mediamente, però, non si raggiungono valori troppo elevati e vengono quindi considerati accettabili (l'obbiettivo non è la qualità dell'ascolto della parola ma la privacy).

6.4.3. Indice di Chiarezza C_{50} – Post

Le stesse distanze fra sorgente e ricevente, e il nuovo tempo di riverberazione calcolato, permettono di valutare l'Indice di chiarezza della fase *post*.

UNI 11367:2010 – Appendice C Ambiente adibito ad ascolto del parlato – Ambiente arredato con due persone al massimo							
C_{50} [dB]	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	avg
Meth app	0,2	1,8	4,0	5,3	6,0	6,4	4,6
Meth punt							5,7
r = 1,23 m	4,3	6,1	8,8	10,4	11,3	11,8	9,6
r = 2,50 m	1,7	3,4	5,9	7,3	8,2	8,7	6,6
r = 2,97 m	1,3	3,0	5,4	6,8	7,7	8,2	6,1
r = 6,25 m	0,5	2,2	4,5	5,8	6,6	7,1	5,1
r = 6,45 m	0,5	2,1	4,4	5,8	6,6	7,0	5,1
r = 7,88 m	0,4	2,0	4,3	5,6	6,5	6,9	5,0
r = 8,34 m	0,4	2,0	4,3	5,6	6,4	6,9	5,0
r = 11,66 m	0,3	1,9	4,2	5,5	6,3	6,7	4,9
r = 11,97 m	0,3	1,9	4,2	5,5	6,3	6,7	4,8
r = 12,59 m	0,3	1,9	4,2	5,5	6,3	6,7	4,8
15							
C_{50} [dB]	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	avg
Meth app	0,6	2,3	4,4	5,8	6,4	6,9	5,1
Meth punt							6,2
r = 1,23 m	3,3	5,3	7,8	9,5	10,2	10,8	8,6
r = 2,50 m	1,5	3,3	5,6	7,1	7,8	8,3	6,4
r = 2,97 m	1,2	3,0	5,3	6,8	7,5	8,0	6,1
r = 6,25 m	0,7	2,5	4,7	6,1	6,8	7,3	5,4
r = 6,45 m	0,7	2,5	4,7	6,1	6,8	7,3	5,4
r = 7,88 m	0,7	2,4	4,6	6,1	6,7	7,2	5,3
16							

C_{50} [dB]	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	avg
Meth app	0,6	1,8	3,9	4,9	5,8	6,2	4,4
Meth punt							5,4
r = 1,23 m	2,8	4,2	6,6	7,8	8,9	9,3	7,2
r = 2,50 m	1,3	2,6	4,8	5,9	6,9	7,3	5,3
r = 2,97 m	1,1	2,4	4,5	5,7	6,6	7,1	5,1
r = 6,25 m	0,7	2,0	4,1	5,1	6,1	6,5	4,6
r = 6,45 m	0,7	2,0	4,1	5,1	6,1	6,5	4,6

Tabella 29 - $C_{50,post}$

Come per lo *STI*, si ha un miglioramento della chiarezza dovuta all'inserimento di elementi fonoassorbenti. I valori sono discreti, perché comunque non raggiungono livelli troppo alti, e possono poi risultare utili in caso di lavori collaborativi svolti in ufficio.

6.4.4. Indice di attenuazione spaziale del livello sonoro ponderato A del parlato al raddoppio della distanza dalla sorgente $D_{2,S}$ – Post

Il calcolo dell'Indice di attenuazione spaziale prevede adesso i nuovi coefficienti di assorbimento delle superfici dell'ambiente e schermi fra le postazioni di lavoro frontali innalzati a 1,6 m.

ISO 3382-3:2012			
Prestazioni acustiche per compiti che richiedono concentrazione e competenze cognitive			
Condizioni	Scarse o insufficienti $D_{2,S}$ < 5 dB		Buone $D_{2,S}$ ≥ 7 dB
ISO 2295:2020			
Spazio di tipologia 4: attività basate in piccola parte su lavoro collaborativo			
Condizione	$D_{2,S}$ ≥ 7 dB		
$D_{2,S}$	15 + 16	15	16
[dB]	8,8	8,4	8,5

Tabella 30 - $D_{2,S,post}$

I valori risultanti superano i limiti minimi che identificano condizioni acustiche buone per ambienti con la destinazione d'uso del caso in esame.

6.4.5. Livello sonoro ponderato A del discorso parlato normale a 4 m dalla sorgente $L_{p,A,S,4m}$ – Post

Con le condizioni della fase *post*, si calcola il Livello del discorso a 4 m.

ISO 3382-3:2012			
Prestazioni acustiche per compiti che richiedono concentrazione e competenze cognitive			
Condizioni	Scarse o insufficienti $L_{p,A,S,4m} > 50$ dB	Buone $L_{p,A,S,4m} \leq 48$ dB	
ISO 2295:2020			
Spazio di tipologia 4: attività basate in piccola parte su lavoro collaborativo			
Condizione	$L_{p,A,S,4m} \leq 47$ dB		
$L_{p,A,S,4m}$	15 + 16	15	16
[dB]	51,5	51,5	51,7

Tabella 31 - $L_{p,A,S,4m,post}$

I valori risultanti superano i limiti massimi indicati dalle normative, ma con l'incertezza dovuta alle formule di tipo previsionale, si possono raggiungere valori coincidenti con quelli che buone le condizioni acustiche di un ambiente ufficio.

6.4.6. Distanza di distrazione r_D – Post

Lo *STI* appena calcolato permette di ricavare la Distanza di distrazione nella condizione di progetto *post*.

ISO 3382-3:2012			
Prestazioni acustiche per compiti che richiedono concentrazione e competenze cognitive			
Condizioni	Scarse o insufficienti $r_D > 10$ m		Buone $r_D \leq 5$ m
[m]	15 + 16	15	16
r_D t.c. *STI* < 0,5	2,80	6,70	impossibile
r_D t.c. *STI* < 0,2	impossibile	impossibile	impossibile

Tabella 32 - $r_{D,post}$

Aumentando l'intelligibilità diminuisca la Distanza di distrazione, tant'è che adesso risulta impossibile raggiungere valori di *STI* inferiori a 0,5 anche nell'ambiente 16. Le distanze sono comunque ragionevoli, viste le dimensioni dell'ufficio. Rimane chiaramente invariata l'impossibilità di raggiungere valori di *STI* inferiori a 0,2.

6.5. Condizione *post operam* con occupazione di persone

Come già accennato nel Paragrafo 6.4.1, nella modellazione non si è tenuto conto di ulteriore oggettistica e soprattutto persone che occupano gli spazi di lavoro.

Se non è facile definire il contributo sull'assorbimento acustico degli oggetti che saranno via via presenti nell'ambiente, risulta senz'altro evidente quale sarà la presenza del personale presso le postazioni di lavoro. In particolare, si tratta di 20 persone in totale, quante infatti sono le scrivanie e le sedie, precisamente 12 nella porzione 15 e 8 nella porzione 16 dell'ufficio.

I calcoli dei parametri vengono pertanto riaffrontati, tenendo in considerazione anche il contributo dato dalle persone.

6.5.1. Tempo di riverberazione T_{60} – Post con occupazione di persone

I dettagli numerici utilizzati per il calcolo sono riportati nella Tabella 33 che segue:

Post operam							
Elemento	Area/Numero	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Pavimento in linoleum	127,41 m^2 (71,67 + 55,74)	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03
Intonaco liscio (pareti)	165,20 m^2 (88,25 + 79,28)	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06
Vetro (finestre)	29,26 m^2 (13,30 + 15,96)	0,12	0,08	0,05	0,04	0,03	0,02
Legno laccato (porte, scrivanie, armadietti)	8,95 (28,22 e 26,11 Contributo porta mobile)	0,14	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08
Sedia da ufficio imbottita	20 (8 + 12)	0,10	0,20	0,25	0,30	0,35	0,35
Intonaco acustico (soffitto)	127,41 m^2 (71,67 + 55,74)	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35
Pannelli fonoassorbenti	58,10 m^2 (35,70 + 22,40)	0,25	0,50	0,85	1,00	1,00	0,90
Persona seduta	20 (12 + 8)	0,12	0,18	0,35	0,56	0,68	0,74

Tabella 33 - Elementi fonoassorbenti condizione *post* con occupazione persone

Tramite i software di elaborazione si ricavano i valori di T_{60} in banda d'ottava per le frequenze da 125 a 4000 Hz:

Condizione	Tempo di riverberazione T_{60} - *Post* con occupazione di persone						
ufficio	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	avg
15 + 16	0,92	0,71	0,51	0,43	0,39	0,37	0,56
15	0,87	0,67	0,48	0,40	0,37	0,35	0,52
16	0,88	0,72	0,53	0,45	0,40	0,38	0,56

Tabella 34 -$T_{60,f,post}$ con occupazione persone

Viene adesso ripresentato il confronto con i valori di riferimento indicati nelle normative e i grafici che risultano nella fase *post* con occupazione di persone del progetto.

UNI 11367:2010 – Appendice C Ambiente adibito ad ascolto del parlato ($50 \leq V \leq 2000$ m^3) – Ambiente non occupato			
Condizione	15 + 16	15	16
T_{ott}	0,84	0,76	0,73
T_{max}	1,01	0,91	0,87
ISO 22955:2020 Spazio di tipologia 4: attività basate in piccola parte su lavoro collaborativo Per spazi di tipologia 1 (attività non ancora cosciuta) e 6 (combinazione di attività nello stesso ambiente): $A/S_{floor} \geq 9$			
Condizione	15 + 16	15	16
$T_{R,125\ Hz} \leq 0,8$ s	0,92	0,87	0,88
$T_{R,avg\ 250\text{-}4000\ Hz} \leq 0,5$ s	0,48	0,45	0,50
A/S_{floor}	0,8	1,5	1,5
DPCM 5-12-1997 Aule scolastiche (utilizzato per calcolo valore medio rappresentativo)			
Condizione	15 + 16	15	16
$T_{R,avg\ 250\text{-}2000\ Hz} \leq 1,2$ s	0,51	0,48	0,53

Tabella 35 - $T_{60,post}$ con occupazione persone

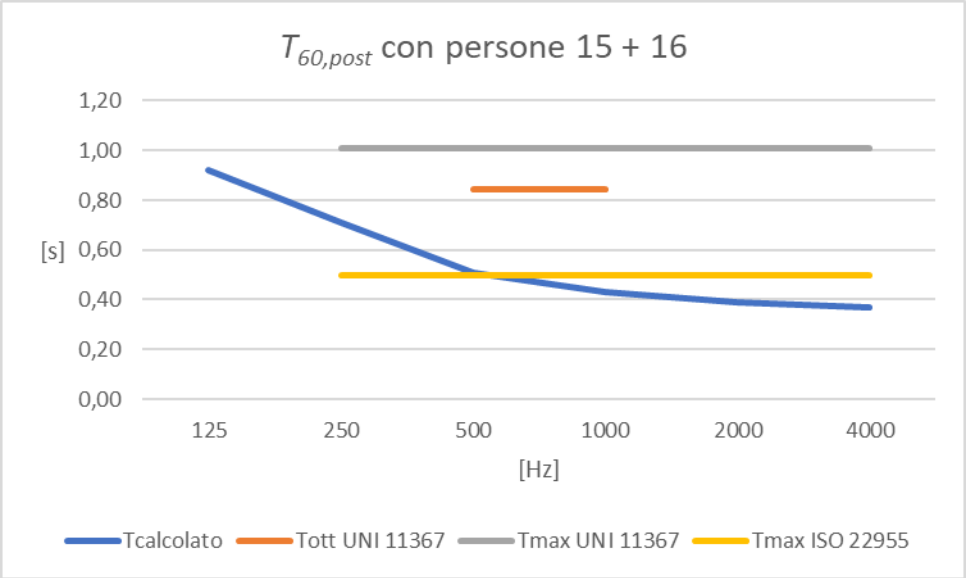


Grafico 7 - $T_{60,post}$ con occupazione persone 15 + 16

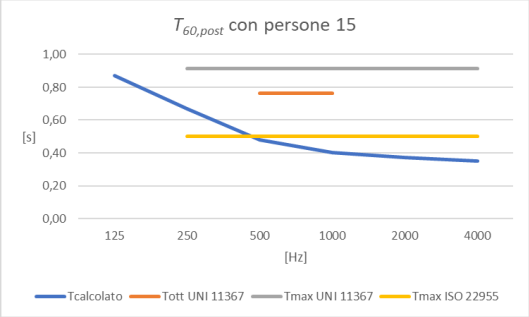


Grafico 8 - $T_{60,post}$ con occupazione persone 15

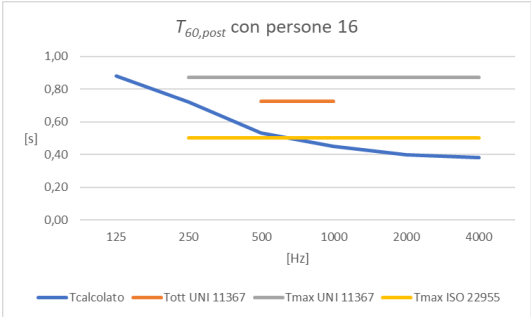


Grafico 9 - $T_{60,post}$ con occupazione persone 16

Con la presenza di persone in ambiente si può notare come il tempo di riverberazione si abbassi ulteriormente, di certo non in maniera marcata come con l'inserimento degli elementi fonoassorbenti, ma comunque con un contributo rilevante. In particolare, sono più numerosi i valori in frequenza che stanno sotto il limite più restringente dato dalla ISO 22955:2020.

Anche il rapporto fra area di assorbimento e superficie del pavimento arriva a superare in modo evidente il valore minimo richiesto.

6.5.2. Speech Transmission Index *STI* – Post con occupazione di persone

Seguendo lo stesso schema di distanze, si procede al calcolo dello *STI* in seguito all'inserimento delle persone nella condizione *post*. I risultati sono espressi in Tabella 36.

UNI 11367:2010 – Appendice C Ambiente adibito ad ascolto del parlato – Ambiente arredato con due persone al massimo Condizioni *STI* ≥ 0,6 ISO 3382-3:2012 Condizioni – Effetto negativo sulla prestazione lavorativa: Riduzione *STI* < 0,5 Scomparsa *STI* < 0,2	
15 + 16	*STI*
r = 1,23 m	0,73
r = 2,50 m	0,52
r = 2,97 m	0,49
r = 6,25 m	0,40
r = 6,45 m	0,40
r = 7,88 m	0,39
r = 8,34 m	0,39
r = 11,66 m	0,39
r = 11,97 m	0,39
r = 12,59 m	0,38
avg	0,45
15	
r = 1,23 m	0,73
r = 2,50 m	0,57
r = 2,97 m	0,55
r = 6,25 m	0,50
r = 6,45 m	0,50
r = 7,88 m	0,49
avg	0,56
16	
r = 1,23 m	0,72
r = 2,50 m	0,59
r = 2,97 m	0,58
r = 6,25 m	0,54
r = 6,45 m	0,54
avg	0,59

Tabella 36 - STI_{post} con occupazione persone

In modo vantaggioso ai fini del progetto, l'intelligibilità al parlato rimane pressoché invariata rispetto alla fase *post* senza occupazione di persone.

6.5.3. Indice di Chiarezza C_{50} – Post con occupazione di persone

Le stesse distanze fra sorgente e ricevente, e il nuovo tempo di riverberazione calcolato, permettono di valutare l'Indice di chiarezza della fase *post* con l'aggiunta delle persone.

UNI 11367:2010 – Appendice C Ambiente adibito ad ascolto del parlato – Ambiente arredato con due persone al massimo							
C_{50} [dB]	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	avg
Meth app	0,5	2,2	4,6	6,0	6,9	7,4	5,3
Meth punt							6,4
r = 1,23 m	4,6	6,6	9,5	11,3	12,4	13,0	10,4
r = 2,50 m	2,0	3,8	6,5	8,2	9,2	9,8	7,4
r = 2,97 m	1,6	3,4	6,1	7,7	8,7	9,3	6,9
r = 6,25 m	0,8	2,5	5,1	6,6	7,6	8,1	5,8
r = 6,45 m	0,8	2,5	5,1	6,6	7,5	8,1	5,8
r = 7,88 m	0,7	2,4	5,0	6,5	7,4	7,9	5,7
r = 8,34 m	0,7	2,4	4,9	6,4	7,4	7,9	5,7
r = 11,66 m	0,6	2,3	4,8	6,3	7,2	7,8	5,6
r = 11,97 m	0,6	2,3	4,8	6,3	7,2	7,8	5,6
r = 12,59 m	0,6	2,3	4,8	6,3	7,2	7,7	5,5
15							
C_{50} [dB]	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	avg
Meth app	0,8	2,6	5,1	6,7	7,4	7,9	5,9
Meth punt							7,0
r = 1,23 m	3,6	5,6	8,6	10,5	11,4	12,0	9,5
r = 2,50 m	1,7	3,6	6,3	8,1	8,9	9,5	7,2
r = 2,97 m	1,5	3,3	6,0	7,8	8,6	9,2	6,9
r = 6,25 m	1,0	2,8	5,4	7,0	7,8	8,4	6,2
r = 6,45 m	1,0	2,8	5,4	7,0	7,8	8,4	6,2
r = 7,88 m	1,0	2,7	5,3	6,9	7,7	8,3	6,1
16							
C_{50} [dB]	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	avg
Meth app	0,8	2,1	4,3	5,6	6,7	7,1	5,0
Meth punt							6,0
r = 1,23 m	3,1	4,5	7,1	8,6	9,9	10,4	7,9
r = 2,50 m	1,5	2,9	5,2	6,7	7,8	8,3	5,9
r = 2,97 m	1,3	2,7	5,0	6,4	7,5	8,0	5,7
r = 6,25 m	0,9	2,2	4,5	5,9	6,9	7,4	5,2
r = 6,45 m	0,9	2,2	4,5	5,9	6,9	7,4	5,2

Tabella 37 - $C_{50,post}$ con occupazione persone

Inserendo le persone in ambiente aumenta il livello di chiarezza, ma con un incremento quasi trascurabile rispetto alla precedente fase di progetto, senza occupazione di persone.

6.5.4. Indice di attenuazione spaziale del livello sonoro ponderato A del parlato al raddoppio della distanza dalla sorgente $D_{2,S}$ – Post con occupazione di persone

Il calcolo dell'Indice di attenuazione spaziale prevede adesso l'aggiunta dei nuovi coefficienti di assorbimento delle superfici dell'ambiente, mentre gli schermi fra le postazioni di lavoro frontali rimangono invariati all'altezza di 1,6 m.

ISO 3382-3:2012			
Prestazioni acustiche per compiti che richiedono concentrazione e competenze cognitive			
Condizioni	Scarse o insufficienti $D_{2,S} < 5$ dB		Buone $D_{2,S} \geq 7$ dB
ISO 2295:2020			
Spazio di tipologia 4: attività basate in piccola parte su lavoro collaborativo			
Condizione	$D_{2,S} \geq 7$ dB		
$D_{2,S}$	15 + 16	15	16
[dB]	8,9	8,5	8,5

Tabella 38 - $D_{2,S,post}$ con occupazione di persone

I valori di attenuazione del livello sonoro si incrementano, se pur di poco, dando risultati migliori in termini di bontà delle condizioni acustiche.

6.5.5. Livello sonoro ponderato A del discorso parlato normale a 4 m dalla sorgente $L_{p,A,S,4m}$ – Post con occupazione di persone

Il Livello del discorso a 4 m viene adesso ricalcolato con le condizioni di questa ultima fase di progetto.

ISO 3382-3:2012		
Prestazioni acustiche per compiti che richiedono concentrazione e competenze cognitive		
Condizioni	Scarse o insufficienti $L_{p,A,S,4m} > 50$ dB	Buone $L_{p,A,S,4m} \leq 48$ dB
ISO 2295:2020		
Spazio di tipologia 4: attività basate in piccola parte su lavoro collaborativo		
Condizione	$L_{p,A,S,4m} \leq 47$ dB	

$L_{p,A,S,4m}$	15 + 16	15	16
[dB]	51,5	51,5	51,7

Tabella 39 - $L_{p,A,S,4m,post}$ con occupazione di persone

6.5.6. Distanza di distrazione r_D – Post con occupazione di persone

Lo *STI* appena calcolato permette di ricavare la Distanza di distrazione nella condizione di progetto *post* con occupazione di persone.

ISO 3382-3:2012			
Prestazioni acustiche per compiti che richiedono concentrazione e competenze cognitive			
Condizioni	Scarse o insufficienti $r_D > 10$ m		Buone $r_D \leq 5$ m
[m]	15 + 16	15	16
r_D t.c. *STI* < 0,5	2,70	6,90	impossibile
r_D t.c. *STI* < 0,2	impossibile	impossibile	impossibile

Tabella 40 - $r_{D,post}$ con occupazione di persone

Rispetto alla condizione *post* senza occupazione di persone, le distanze tali per cui si ottiene una riduzione dello *STI*, rimangono sostanzialmente invariate, al netto di un margine di qualche centimetro.

7. Confronto fra le fasi di progetto

Per una lettura più immediata dei risultati ottenuti, si riporta, per ogni parametro impiegato, il confronto dei valori rappresentativi di ognuna delle fasi di progetto (*pre operam*, *post operam* e *post operam con occupazione di persone*).

Condizione ambiente	Fase progetto	$T_{125\text{-}4000\ Hz}$ [s]	A/S_{floor} [adim]	STI_{avg} [adim]	$C_{50,avg}$ [dB]	$D_{2,S}$ [dB(A)]	$L_{p,A,S,4m}$ [dB(A)]	r_D [m]
15 + 16	*Pre*	1,61	0,3	0,44	-2,5	4,7	52,7	1,80
	Post	0,60	0,8	0,45	5,7	8,8	51,5	2,80
	Post + pp	0,56	0,8	0,45	6,4	8,9	51,5	2,70
15	*Pre*	1,53	0,5	0,49	-2,2	4,3	52,7	1,90
	Post	0,56	0,9	0,56	6,2	8,4	51,5	6,70
	Post + pp	0,52	1,5	0,56	7,0	8,5	51,5	6,90
16	*Pre*	1,48	0,7	0,47	-2,1	4,4	52,9	1,40
	Post	0,60	0,8	0,60	5,4	8,5	51,7	imposs.
	Post + pp	0,56	1,5	0,59	6,0	8,5	51,7	imposs.

Tabella 41 - Confronto per ogni parametro nelle diverse condizioni e fasi di progetto

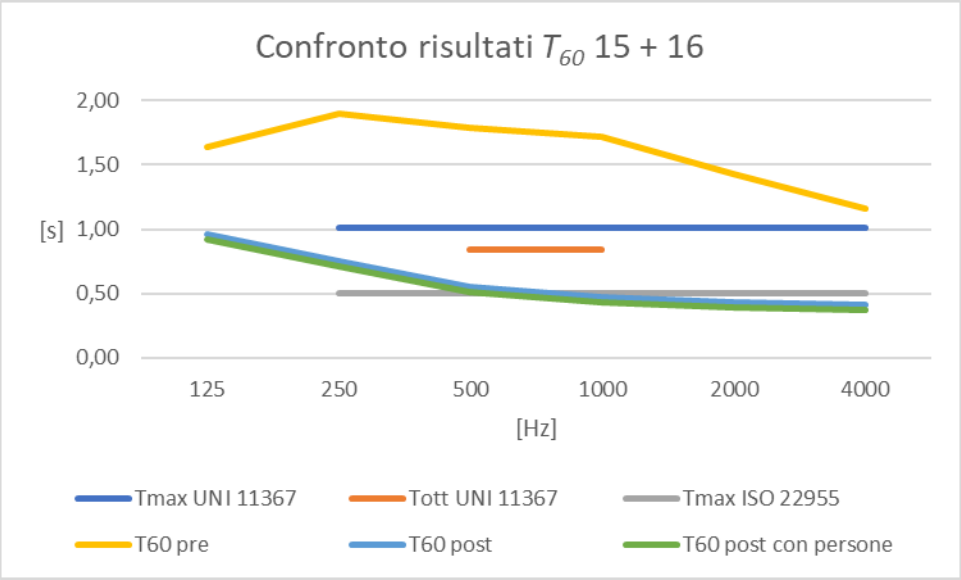


Grafico 10 - Confronto T_{60} condizione 15 + 16

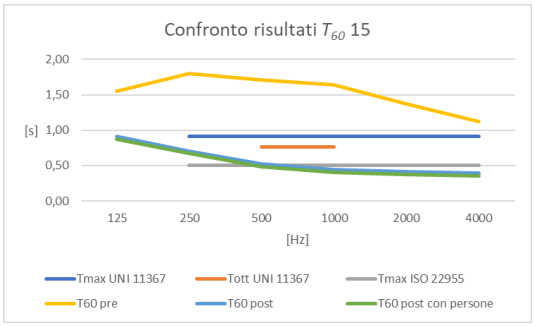


Grafico 11 - Confronto T_{60} condizione 15

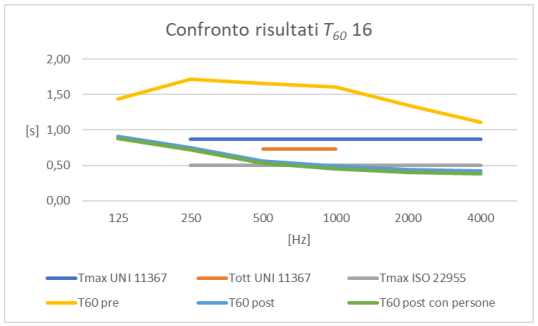


Grafico 12 - T_{60} condizione 16

Tramite la sintesi numerica e grafica dei risultati che rappresentano l'iter progettuale, si evince la prevista riuscita dell'intervento di correzione acustica per gli uffici considerati.

Una volta applicate tutte le soluzioni tecnologiche indicate, si riscontrerà un ulteriore miglioramento per il cosiddetto *Effetto Lombard*, secondo cui più è presente il rumore di fondo nell'ambiente più un parlatore tende involontariamente ad alzare il volume della voce (ma anche il tono, l'articolazione e la lunghezza delle sillabe), generando una condizione di stress e stanchezza psico-fisica.

8. Conclusioni

Sono diverse le osservazioni che si possono fare in conclusione di questo lavoro.

Un primo aspetto da considerare è la natura del metodo con cui si è affrontato il progetto. L'impossibilità di svolgere misure fonometriche negli spazi analizzati, ha imposto l'utilizzo di formule previsionali. Come già avevo avuto modo di constatare tramite esperienze passate, un algoritmo di calcolo rende comunque rappresentativo uno stato dell'arte che prediligerebbe un'indagine di tipo empirico. Certo, una rilevazione ben eseguita sarà senz'altro più fedele di un calcolo – detto appunto "previsionale" – ma non va dimenticato che comunque anche una misura presenta un'incertezza rispetto al valore reale (avevo osservato che mediamente lo scarto massimo è pari al 10 %), data la variabilità dell'azione umana, l'esatto posizionamento dei microfoni, oppure la taratura dello strumento e l'usura di alcune sue componenti, così come la casualità degli eventi che possono verificarsi dentro e fuori l'ambiente in cui si sta svolgendo l'indagine.

Risulta corretto parlare di "validità" dei metodi di calcolo, forse ancora di più nel momento in cui essi hanno la tendenza ad essere cautelativi rispetto alle caratteristiche reali del sistema studiato: cioè i valori risultanti dai calcoli non saranno mai più soddisfacenti di quelli ricavati dalle misure, al massimo saranno pressoché uguali (valori più soddisfacenti illuderebbero il progettista circa una qualità acustica non propria dell'ambiente esaminato). Va da sé che comunque, numeri eccessivamente meno soddisfacenti di quelli reali non avrebbero confermato l'efficacia dei metodi di calcolo.

Tornando a considerare adesso i dati ricavati per le diverse fasi di progetto, si può affermare che il comportamento acustico degli spazi adibiti ad ufficio risulta piuttosto omogeneo, cioè i parametri ricavati nelle varie postazioni di lavoro non si discostano eccessivamente fra loro. Qualche differenza si inizia a notare in maniera più marcata quando, nel sistema sorgente-ricevente, la loro distanza inizia a farsi marcata, relativamente comunque ai volumi del locale.

Nel dettaglio, si nota che l'ufficio è più "asciutto" alle alte frequenze, cioè il tempo di riverberazione diminuisce man mano che si sale di frequenza. L'intelligibilità al parlato e la

chiarezza non raggiungono valori performanti nella prima fase del progetto, ma come abbiamo visto questo risultava un vantaggio, perché l'obbiettivo in questo caso non è ascoltare bene, ma non sentire e non farsi sentire troppo. Quasi sempre andare a migliorare il tempo di riverberazione significa migliorare anche l'intelligibilità e la chiarezza, divenendo poi, infatti, non più vantaggiose come all'inizio (il ragionamento è analogo anche per la Distanza di distrazione).

L'attenuazione e il parlato a 4 metri sono quei parametri che prevedono più incertezza nel risultato, non a caso si tratta di formule informali, non ufficializzate in normativa. Si è potuto intanto notare come le caratteristiche fonoassorbenti delle superfici circostanti incidano molto pesantemente sulle prestazioni finali. Pensare a buone prestazioni acustiche già in sede di progetto, scegliendo quindi determinati materiali piuttosto che altri, è tutto di guadagnato sulla qualità dell'ambiente.

L'omogeneità del comportamento del locale e la scelta vincente dei materiali fonoassorbenti hanno determinato la buona efficacia del progetto sia ad ambiente intero (15 + 16) sia ad ambiente separato (15 e 16), cioè una volta chiusa la parete mobile. Il rischio sarebbe stato addirittura di esagerare con le prestazioni nella condizione separata degli spazi, considerata la riduzione del volume. A seconda delle attività che vengono svolte, l'ufficio funziona in ogni sua configurazione.

Un progetto è valido quando è realizzabile. Si prova quindi a fare una stima dell'impegno economico che dovrebbe essere sostenuto per concretizzare l'opera, almeno dal punto di vista dei pannelli fonoassorbenti.

Il produttore individuato propone tre livelli di finitura degli elementi: bianco o nero, colorati o con la stampa di immagini a scelta del cliente. In Tabella 42 sono riportati i prezzi unitari e, in base alle quantità richieste per il progetto, il prezzo totale:

Forma elemento	Dimensioni [m]	Quantità [n]	Bianco/Nero [€/cad]	Colore [€/cad]	Stampa [€/cad]
Circolari	ϕ 0,45	0	11,10	28,80	40,80
	ϕ 0,65	0	17,10	54,00	65,40
	ϕ 0,85	0	26,10	90,00	105,00
	ϕ 1,25	10	53,10	203,00	287,58
Rettangolari	0,5 x 0,7	0	8,40	18,90	27,30
	0,7 x 1,0	4	16,80	37,80	54,60

	1,0 x 1,4	6	33,60	75,60	109,20
	1,4 x 2,0	8	67,20	151,20	218,40
Bobina velcro	25 m	4	41,40	41,40	41,40
Pendini	Scatola	10	48,80	48,80	48,80
		€ tot	**1991,00**	**4498,00**	**6150,20**

Tabella 42 - Prezzi dei pannelli fonoassorbenti

Le cifre totali non comportano una spesa particolarmente onerosa, a maggior ragione per il portafogli di un'azienda solida.

Un ulteriore aspetto su cui riflettere riguarda la scelta di quanto intervenire con la correzione acustica. I dati finali delle fasi *post operam* e *post operam con occupazione di persone* sono a volte prossimi al limite del raggiungimento dei valori di riferimento. Si tratta di una scelta consapevole, o meglio di più scelte fatte ponendosi sotto diversi punti di vista.

Se dovessimo considerare il solo obbiettivo numerico, vale a dire un raggiungimento ampiamente soddisfacente di tutti i valori indicati nelle normative di riferimento, c'è poco da discutere: sarebbe bastato aggiungere più elementi fonoassorbenti e/o aggiungere sistemi di fonoassorbimento che sfruttano principi differenti da quello impiegato nel progetto, oppure sostituire completamente tutti gli intonaci e applicare un controsoffitto molto performante. Avremmo avuto un'ulteriore riduzione dei tempi di riverberazione ed una maggiore copertura nello spettro delle frequenze. Ma non basta.

Prima di tutto vanno ben ponderati i costi, i tempi e le interferenze che necessariamente si creerebbero fra i lavori edili e i lavori che vengono svolti dalle persone all'interno dell'Azienda, creando così un inevitabile danno economico.

Poi potremmo fare considerazioni a livello estetico: a prescindere dalla finitura dei pannelli, un ambiente caricato in maniera pesante di elementi acustici sembrerebbe più un laboratorio di ricerca piuttosto che un luogo in cui svolgere attività di ufficio.

Inoltre, ricordandosi del fattore economico dei materiali e della manodopera, cautelativo delle formule previsionali, variabile delle tipologie di attività che possono essere svolte nell'ufficio, è ragionevole dichiarare che un ulteriore intervento risulti superfluo; i risultati

risultano infatti già soddisfacenti, e perciò si tratterebbe più di un lieve miglioramento delle prestazioni acustiche piuttosto che di un'ulteriore correzione.

In conclusione, è un pensiero più di carattere generale quello che voglio fare.

Trovo incredibile come sia intrinseca nella natura delle cose l'*allegoria della coperta*, il concetto per cui *se si tira da una parte ci si scopre dall'altra*.

È quello che si impara anche in questo percorso di formazione: in un sistema edilizio, denominato non casualmente "sistema", ogni professionista fornisce il suo specifico contributo tecnico, ma è il risultato finale che conta. Un insieme complesso può funzionare solo se si è in grado di trovare la giusta misura di ogni sua singola componente.

Da questa parte, negli argomenti di questo elaborato, le soluzioni ricercate raggiungono gli obbiettivi di qualità acustica, garantendo così il benessere psico-fisico e le condizioni ottimali per lo svolgimento delle attività da parte dell'utenza.

Questa conclusione, benché trovata dalle mie modeste idee, mi è parsa così giusta che ho pensato di metterla qui, come la risultante di tutta la trattazione. La quale, se non vi è dispiaciuta affatto, vogliatene bene a chi l'ha scritta, e anche un pochino a chi l'ha raccomodata. Ma se invece fossi riuscito ad annoiarvi, credete che non l'ho fatto apposta.

Bibliografia

[1] DPCM 5-12-1997 *Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici*

[2] UNI EN ISO 3382-1:2008 *Misurazione dei parametri acustici degli ambienti – Parte 1: Sale da spettacolo*

[3] UNI EN ISO 3382-2:2008 *Misurazione dei parametri acustici degli ambienti – Parte 2: Tempo di riverberazione negli ambienti ordinari*

[4] BS EN 60268-16:2011 *Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index*

[5] UNI 11532-1:2018 *Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati – Metodi di progettazione e tecniche di valutazione – Parte 1: Requisiti generali*

[6] UNI 11367:2010 *Classificazione acustica delle unità immobiliari – Appendice C*

[7] ANSI S3.5, 1997, *Methods for the calculation of the Speech Intelligibility Index*

[8] UNI EN ISO 9921:2004 *Ergonomia – Valutazione della comunicazione verbale*

[9] SPAGNOLO RENATO, 2015, *Acustica. Fondamenti e applicazioni*, Utet Università

[10] PISANI RAFFAELE, 2009, *Valutazione della qualità acustica per sale da spettacolo*, Studio di Ingegneria Acustica Rivoli (Torino)

[11] FARINA ANGELO, 2001, *Misure acustiche nelle sale*, Università degli Studi di Parma

[12] SECCHI SIMONE, *La qualità acustica delle sale*, Università degli Studi di Firenze

[13] MORETTI ELISA, *Acustica architettonica*, Università degli Studi di Perugia

[14] ANIT TEP S.r.l., 2018, *Neo Eubios – bene et commode vivens*, Periodico trimestrale n. 64, anno XIX, Giugno 2018

[15] ANIT TEP S.r.l., 2011, *Manuale di acustica edilizia – Vol.3*, Ingraph

[16] ANIT TEP S.r.l., 2018, *Neo Eubios – bene et commode vivens*, Periodico trimestrale n. 65, anno XIX, Settembre 2018

[17] IEC, 2023, *Il comfort acustico negli uffici*, Torino

[18] CPA, 2015, *Future workstyles and future workplaces in the City of London, City of London corporation and the City Property Association*

[19] NF S 31-080:2006 *Acoustics – Offices and associated areas – Acoustic performance levels and criteria by type of area*

[20] UNI EN ISO 14257:2004 *Acustica – Misurazione e descrizione parametrica delle curve di decadimento del suono nello spazio degli ambienti di lavoro per la valutazione delle loro prestazioni acustiche*

[21] UNI EN ISO 3382-3:2013 *Acustica – Misurazione dei parametri acustici degli ambienti – Parte 3: Open space*

[22] UNI ISO 22955:2023 *Acustica – Qualità acustica degli spazi open-office*

[23] UNI EN ISO 717-1:2013 *Acustica – Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e in elementi di edificio – Parte 1: Isolamento acustico per via aerea*

[24] BS 8233:1999 *Sound insulation and noise reduction for buildings. Code of practice*

[25] ANSI 3.5:1997 *Methods for calculation of the Speech Transmission Index*

[26] ASTM E 1130:2002 *Standard test method for objective measurement of speech privacy in open plan spaces using Articulation Index*

[27] WANG-BRADLEY, 2002, *A mathematical model for a single screen barrier in open-space offices*

[28] ISO 20189:2018 *Acoustics – Screens, furniture and single objects intended for interior use – Rating of sound absorption and sound reduction of elements based on laboratory measurements*

[29] ISO 23351-1:2020 *Acoustics – Measurements of speech level reduction of furniture ensambles and enclosures – Part 1: Laboratory method*

[30] KERÄNEN J., HANGISTO V., *Applied Acoustics 71 (2013) 1315-1325 – Prediction of the spatial decay of speech in open-plan offices*, Elsevier

[31] MAZZARELLA LIVIO, 2023, *Room Acoustics – Sound absorption*, Politecnico di Milano

[32] GRUPPO TECNICO INTERREGIONALE PREVENZIONE IGIENE E SICUREZZA SUI LUOGHI DI LAVORO, 2021, *Indicazioni operative per la prevenzione del rischio da Agenti Fisici ai sensi del Decreto Legislativo 81/2008 – Parte 4: Rumore*

[33] D LGS 81 9 APRILE 2008 *Testo unico sulla salute e sicurezza sul lavoro*