



in partnership con



## 2<sup>^</sup> ed. Corso “Acustica degli uffici” (cod.754/21)

Corso del 09/06/2021

Docente Dott. Stefano De Stabile

# 1 Richiami di Acustica degli Ambienti Chiusi

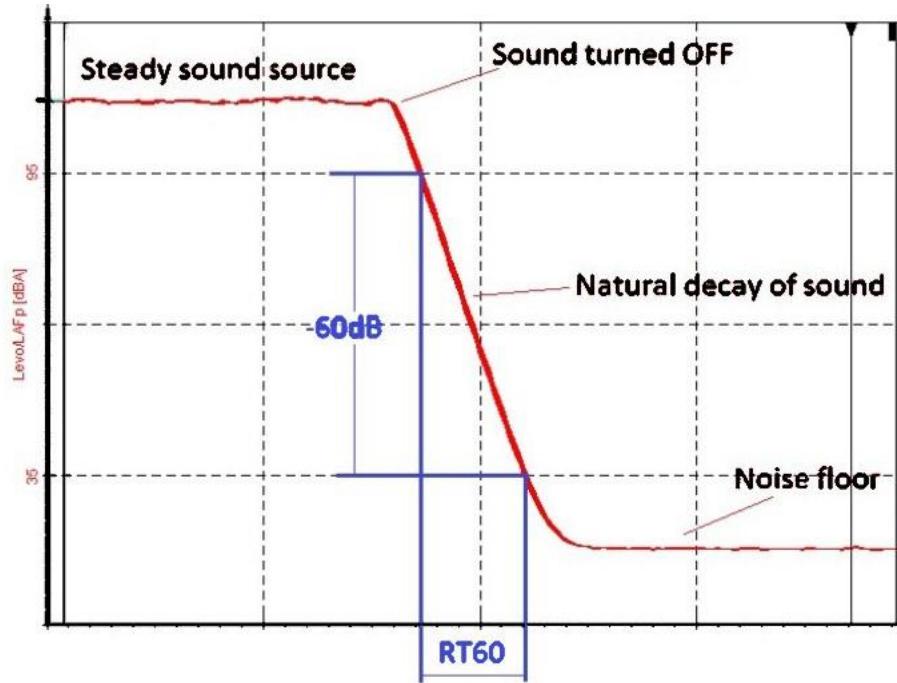
In questo capitolo richiameremo due descrittori acustici : il tempo di riverbero e l'intelligibilità.

## 1.1 *Tempo di Riverbero*

Il tempo di riverbero è un parametro che si misura in secondi e che fornisce un'indicazione chiara di quale sia il decadimento temporale dell'energia acustica all'interno di un determinato ambiente.

Il grafico della pagina successiva mostra il significato fisico del tempo di riverbero che può essere così concettualmente espresso:

Posta all'interno di un ambiente una determinata sorgente di rumore stazionario,  
se al tempo  $t_0$  la sorgente viene istantaneamente spenta,  
il Tempo di Riverbero (normalmente indicato con RT, RT60 o anche T60)  
è il **tempo** necessario perché il **livello sonoro**, in un determinato punto,  
**si riduca di 60 dB** rispetto al valore iniziale.



Nella realtà, per effetto della presenza in tutti gli ambienti di un determinato rumore di fondo, non si riesce quasi mai a misurare un decadimento di 60 dB nel livello sonoro, ragion per cui ci si limita a misurare il tempo necessario per rilevare un decadimento sonoro di 20 (T20) o 30 dB (T30) e, nell'ipotesi di campo diffuso, a moltiplicare il risultato rispettivamente per 3 o per 2 onde ottenere un valore congruo a T60.

### NOTA IMPORTANTE

**Sia i software di misura che quelli di simulazione quando restituiscono i valori di T20 e di T30 lo fanno avendoli già moltiplicati rispettivamente per 3 o per 2.**

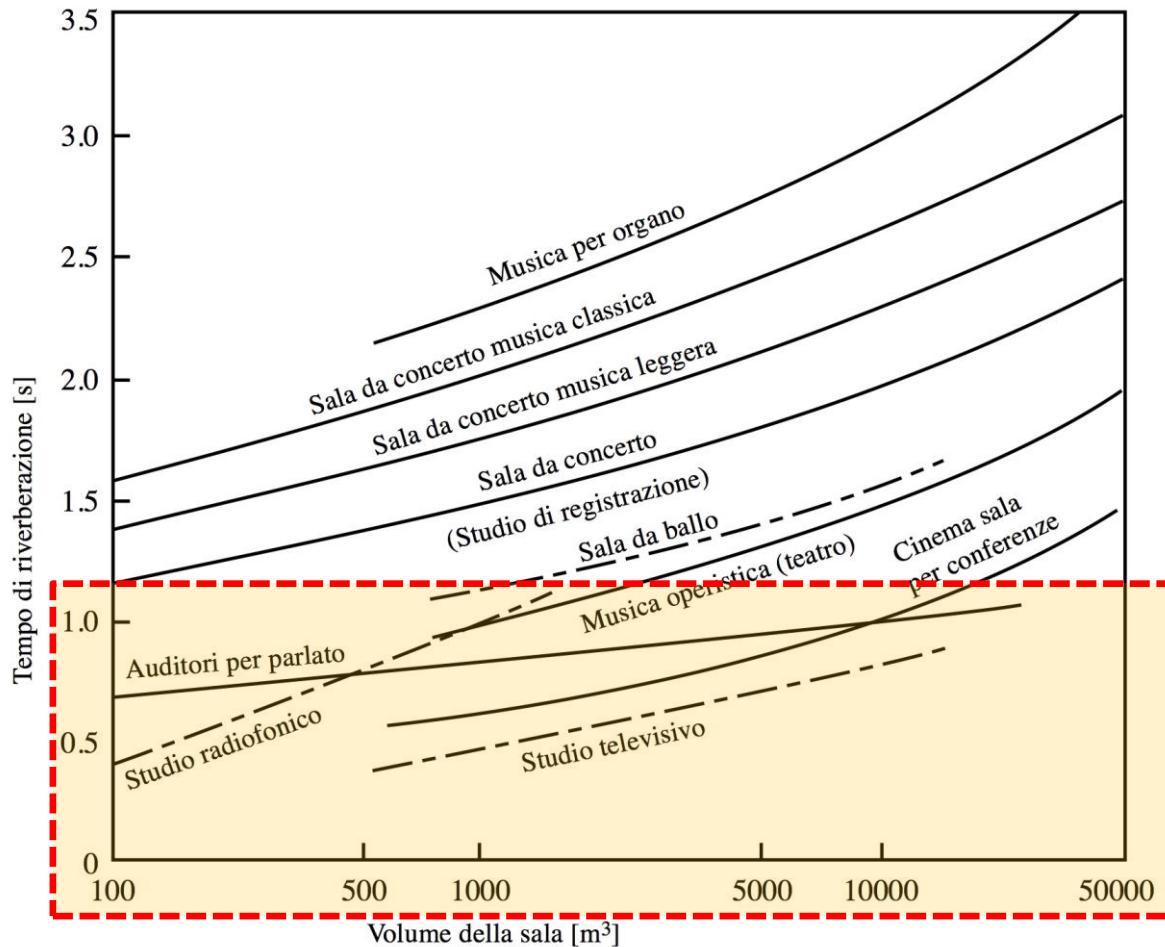
**In altri termini tali valori sono già congrui a T60 e quindi non vanno mai moltiplicati per i rispetti fattori!**

Il Tempo di Riverbero dipende sia dalla geometria che dalle proprietà acustiche (in particolare dal coefficiente di assorbimento) dei materiali che rivestono le superfici dell'ambiente; quest'ultima dipendenza si traduce nel fatto che il Tempo di Riverbero è un parametro che può assumere valori diversi alle varie frequenze (ossia, RT è funzione di  $f$  ).

Relativamente poi alla sua variabilità spaziale, negli ambienti reali, dove il campo acustico non è mai né omogeneo né isotropo, RT non è costante, ma varia in funzione della posizione in cui lo si valuta.

Oltre a questi aspetti, è opportuno ricordare che non esiste un valore ottimale di RT, ma vi sono intervalli di qualità entro i quali RT dovrebbe collocarsi, intervalli che variano in funzione della dimensione dell'ambiente e della sua destinazione d'uso.

Nella figura seguente mostriamo uno dei tanti grafici reperibili nella letteratura di settore che riporta gli intervalli ottimali di RT in funzione della volumetria della sala e del tipo di evento sonoro che vi si riproduce.



Ciò il grafico precedente pone in chiara evidenza è che per gli ambienti destinati alla riproduzione e comprensione della parola è necessario che RT si attesti su valori oggettivamente limitati.

Note le caratteristiche geometriche e la natura dei materiali costituenti un determinato ambiente è possibile stimare il valore del tempo di riverbero facendo ricorso a ben note relazioni matematiche relativamente semplici: tutte queste formule «classiche» sono però caratterizzate da ipotesi semplificatrici e di conseguenza da ben precisi campi e limiti di applicabilità.

Nel caso di ambienti acusticamente «complessi», per stimare i valori e l'andamento in frequenza del tempo di riverbero è pertanto necessario fare ricorso all'uso di software di modellazione acustica.

Anche questi software però sono soggetti a limitazioni ben precise: in particolare - e indipendentemente dall'algoritmo di calcolo che lo specifico software sfrutta (ray-tracing, metodo delle sorgenti immagine, metodi ibridi) - , essi si basano tutti sull'approssimazione nota come «acustica geometrica», ossia sull'ipotesi che la lunghezza d'onda sia «piccola» rispetto alle dimensioni dell'ambiente e/o degli oggetti in esso contenuti, ovvero, detto in altri termini, quando l'oggetto è «grande» rispetto alla lunghezza d'onda: in questi casi la natura ondulatoria del fenomeno acustico può essere trascurata e l'onda acustica è approssimabile con un vero e proprio «raggio» sonoro.

Anche nel caso di utilizzo di un software di simulazione, le formule «classiche» per il calcolo del tempo di riverbero possono però essere comunque utilizzate con lo scopo di eseguire una verifica di consistenza dei risultati emergenti da una sessione di simulazione

Di seguito forniamo un riepilogo di quelle che sono le relazioni «classiche» che consentono di stimare il tempo di riverbero di un determinato ambiente

Autore	Formula	Campo di applicabilità e limiti
Sabine	$RT = \frac{0,161 \cdot V}{\sum_k S_k \cdot \alpha_k + 4 \cdot m \cdot V}$ <p>Dove</p> <p>RT: tempo di riverbero in secondi  V: Volume dell'ambiente, in <math>m^3</math>  <math>S_k</math>: area della k-esima superficie, in <math>m^2</math>  <math>\alpha_k</math>: coefficiente di assorbimento acustico del materiale della k-esima superficie  m: coefficiente di assorbimento dell'aria</p>	<p>La formula è ragionevolmente attendibile nel caso di ambienti "vivaci", ovvero caratterizzati da materiali con coefficienti di assorbimento "piccoli" (indicativamente per <math>\alpha &lt; 0.2</math>). Per <math>\alpha</math> grandi la formula non è valida e al limite per <math>\alpha \rightarrow 1</math> conduce ad un risultato fisico privo di senso.</p>
Eyring/ Millington-Sette	$RT = \frac{0,161 \cdot V}{-\sum_k S_k \cdot \ln(1 - \alpha_k) + 4 \cdot m \cdot V}$ <p>dove le lettere e i simboli hanno il medesimo significato del caso precedente</p>	<p>La formula converge a quella di Sabine nel limite di <math>\alpha</math> piccoli, ma risulta ragionevolmente attendibile anche per valori grandi di <math>\alpha</math></p>
Fitzroy	$RT = 0,161 \cdot \frac{V}{S} \cdot \left[ \frac{S_x}{S} \cdot \frac{1}{\ln(1 - \alpha_x)} + \frac{S_y}{S} \cdot \frac{1}{\ln(1 - \alpha_y)} + \frac{S_z}{S} \cdot \frac{1}{\ln(1 - \alpha_z)} \right]$ <p>dove, oltre ai simboli noti già introdotti in precedenza, si ha</p> <p><math>S_x</math>: Superficie delle pareti parallele presenti lungo l'asse x  <math>S_y</math>: Superficie delle pareti parallele presenti lungo l'asse y  <math>S_z</math>: Superficie delle pareti parallele presenti lungo l'asse z  <math>\alpha_x</math>: coefficiente medio di assorbimento delle pareti presenti lungo l'asse x  <math>\alpha_y</math>: coefficiente medio di assorbimento delle pareti presenti lungo l'asse y  <math>\alpha_z</math>: coefficiente medio di assorbimento delle pareti presenti lungo l'asse z</p>	<p>La formula si applica solo ad ambienti rettangolari e tiene conto anche degli aspetti geometrici dell'ambiente ed in particolare dei modi di oscillazione (longitudinali, trasversali e verticali) che si innescano tra le superfici parallele disposte lungo i tre assi x, y e z.</p>

## 1.2 *Intelligibilità*

Prima di addentrarci nell'argomento occorre chiarirsi sul significato del termine “intelligibilità”: dire che un discorso è *intelligibile* non implica affatto che esso sia *comprendibile*.

L'intelligibilità riguarda solamente la capacità di percepire uditivamente in modo corretto e privo di distorsioni i fonemi, le sillabe, le parole che vengono pronunciate.

La comprensione di un discorso invece dipende dal patrimonio intellettuale, culturale e professionale dell'ascoltatore e dell'oratore.

In altre parole, se l'intelligibilità è elevata significa che chiunque può “udire” correttamente tutte le parole che vengono pronunciate in un seminario di fisica quantistica; ciò nonostante saranno comunque pochi quelli in grado di “comprendere” il significato di quanto enunciato.

Dal punto di vista acustico l'intelligibilità di un messaggio vocale è influenzata in modo determinante da alcune variabili; nel prospetto successivo riepiloghiamo quelle principali.

Variabile Acustica	Relazione con l'intelligibilità
<b>Rumore di Fondo</b>	Come regola generale, l'intelligibilità è inversamente proporzionale al livello del rumore di fondo (o più precisamente al rapporto segnale/rumore, S/N): se il rumore aumenta l'intelligibilità diminuisce.
<b>Tempo di Riverbero</b>	Come per il rumore di fondo, un eccesso di riverbero interferisce negativamente con l'intelligibilità del parlato; se RT aumenta, l'intelligibilità diminuisce.
<b>Caratteristiche della sorgente</b>	L'intelligibilità dipende anche da proprietà e tipologia della sorgente sonora; nel caso ad esempio di messaggi vocali diffusi da altoparlanti la funzione di trasferimento e la direttività degli speaker giocano un ruolo fondamentale per l'intelligibilità. Se invece la sorgente è un oratore, l'intelligibilità è in genere, se pur di poco, diversa per una voce maschile o femminile.
<b>Distanza dalla sorgente</b>	Il livello sonoro com'è noto diminuisce in modo significativo con l'allontanamento dalla sorgente; allo stesso modo anche l'intelligibilità decresce.

Introdotto il concetto generale di intelligenza sorge adesso una domanda cruciale:

È possibile **misurare** l'intelligenza? E se sì, come?

Dal punto di vista generale per misurare l'intelligenza esistono due metodi distinti: il metodo **SOGGETTIVO** e il metodo **OGGETTIVO**.

Metodo	Descrizione
<b>Soggettivo</b>	La misura prevede l'impiego di un oratore e una serie di soggetti normouidenti che vengono distribuiti all'interno dell'ambiente e ai quali vengono fatte ascoltare serie standardizzate di fonemi: monosillabi, bisillabi, parole in rima, termini privi di significato, ecc. Per ogni termine pronunciato dall'oratore gli «ascoltatori» devono scrivere cosa effettivamente hanno udito.
<b>Oggettivo</b>	Prevede l'utilizzo di strumentazione che procede alla determinazione dei valori assunti da un <u>descrittore specifico correlato al grado di intelligenza</u> (STI, AI, Alcons%, ecc.). La misura di tali descrittori può avvenire in modo diretto (es.: mediante adozione del metodo STIPA) o indiretto (es., mediante la determinazione della risposta all'impulso e successivo «calcolo» del descrittore specifico).

Nelle pagine successive forniamo un quadro sintetico dei descrittori deputati alla valutazione dell'intelligenza e dei rispettivi vantaggi e svantaggi connessi ad ogni metodo.

Descrittore	Significato	Metodo di Valutazione
WT	<b>Word Test – Test delle Parole.</b> E' basato sulla comprensione da parte degli ascoltatori di specifiche parole contenute all'interno di una frase	SOGGETTIVO
MRT	<b>Modified Rhyme Test – Prova della rima modificata.</b> Test basato sulla comprensione da parte degli ascoltatori di singoli gruppi di parole in rima	SOGGETTIVO
PB	<b>Phonetically Balanced Test – Prova delle parole foneticamente bilanciate.</b> Il test può essere condotto a partire da tabelle standardizzata di 256 o 1.000 parole	SOGGETTIVO
STI	<b>Speech Transmission Index – Indice di Trasmissione del Parlato.</b> Si basa sulla determinazione della funzione di trasferimento di modulazione $m(f)$ per 98 punti ottenuti a partire da 14 frequenze di modulazione per le 7 bande di ottava comprese tra 125 Hz e 8 kHz	OGGETTIVO
STIPA	<b>Speech Transmission Index for Public Address Systems – Indice di Trasmissione del Parlato per sistemi Public Address.</b> Si usa al posto di STI quando il messaggio vocale è riprodotto da un impianto elettroacustico di diffusione sonora (PA System)	OGGETTIVO
STITEL	<b>Speech Transmission Index for Telecommunication System - Indice di Trasmissione del Parlato per sistemi di Telecomunicazione.</b> Si usa al posto di STI quando il messaggio vocale è trasmesso attraverso un sistema di telecomunicazione (es.: impianto interfonico, telefono, ecc.)	OGGETTIVO
RASTI	<b>Rapid Speech Transmission Index - Indice di Trasmissione del Parlato Rapido.</b> Era una versione semplificata di STI utile quando i tempi di calcolo erano notevoli; è un descrittore che oggi non si utilizza più.	OGGETTIVO
%ALcons	<b>Articulation Loss of Consonants – Perdita di Articolazione delle Consonanti.</b> Questo descrittore non è attendibile nel caso il messaggio vocale sia diffuso da un impianto elettroacustico (PA System). ALcons dipende dal tempo di riverbero, dalla direttività della sorgente e dall'attenzione dell'ascoltatore.	OGGETTIVO

Metodi Soggettivi	Metodi oggettivi
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Test di parole (WT)</li> <li>• Test a rima modificata (MRT)</li> <li>• Test a parole foneticamente bilanciate (PB)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• STI; STIPA; STIEL</li> <li>• %Alcons</li> <li>• SIL (Speech Interference Level)</li> <li>• SII (Speech Intelligibility Index)</li> <li>• C50 (Clarity Index 50 msec)</li> <li>• AI (Articulation Index), ecc.</li> </ul>
PRO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Molto affidabili</li> <li>• Ben collaudati</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Metodi in situ pratici e veloci</li> <li>• Alcuni parametri (STI) sono standardizzati</li> <li>• Buona correlazione con l'intelligibilità (soprattutto per valori medi ed elevati)</li> </ul>
CONTRO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Molto complessi da gestire e costosi</li> <li>• Parzialmente dipendenti dall'oratore</li> <li>• Dipendenti dal ceppo linguistico</li> <li>• Post-processing lungo</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sono tutte misure indirette dell'intelligibilità</li> <li>• Alcune procedure non semplici da implementare ed automatizzare</li> </ul>

Volendo semplificare questo quadro abbastanza complesso, possiamo comunque affermare che in una grande maggioranza dei casi, il descrittore **STI** (o **STIPA** nel caso sia presente un impianto audio di diffusione sonora) rappresenta la scelta ottimale per la valutazione dell'intelligibilità del parlato.

I valori che **STI** (e/o **STIPA**) può assumere sono compresi nell'intervallo (0 , 1), dove "0" indica la completa mancanza di intelligibilità mentre di converso "1" identifica una situazione di intelligibilità perfetta; ovviamente nella realtà questi valori estremi non si verificano mai, ma ci si troverà sempre all'interno dell'intervallo sopra indicato dove ad un determinato valore di STI (o STIPA) corrisponde un preciso grado di intelligibilità secondo il seguente schema:

Valore Assunto da STI (STIPA)	Intelligibilità
$STI > 0.75$	Eccellente
$0.60 < STI \leq 0.75$	Buona
$0.45 < STI \leq 0.60$	Sufficiente/Accettabile
$0.30 < STI \leq 0.45$	Insufficiente/scarsa
$STI < 0.30$	Pessima

Essendo il metodo più diffuso per la misura dell'Intelligibilità, conviene fornire qualche elemento in più riguardo il metodo STI (o STIPA, nel caso di parlato diffuso da altoparlanti).

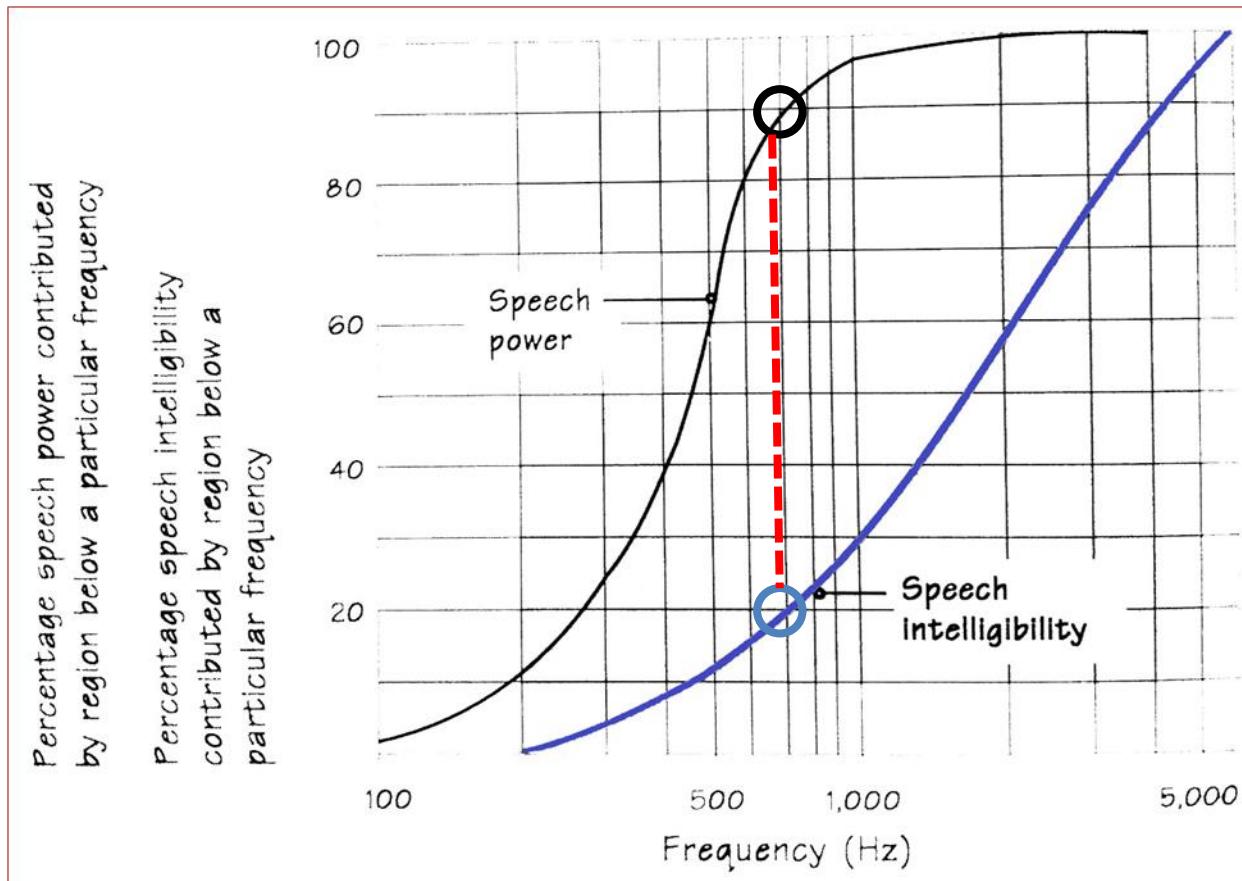
In realtà non c'è un valore unico per STI, ma ne esistono ben 98, ossia un valore in ognuna delle 14 bande di frequenze di modulazione (da 0,63 a 12,5 Hz), per ognuna delle 7 bande di ottava comprese tra 125 e 8000 Hz. Una volta determinata questa matrice (nota come matrice di modulazione della funzione di trasferimento, o «**mtf**»), il valore conclusivo di STI si ottiene mediante una serie di operazioni complesse che chiamano in causa specifici fattori di ponderazione ( $\alpha$  e  $\beta$ ) distinti per voce maschile e femminile. Nella figura seguente riportiamo un esempio di quale sia il risultato di una misura di STI.

Modulation Frequency (Hz)	Received Modulation Reduction (distortion)						
	Octave Bands						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Level dB-SPL	31.7	31.3	35.9	37.9	40	42.9	45.2
0.63	0.661	0.395	0.490	0.793	0.901	0.938	0.954
0.8	0.658	0.391	0.486	0.791	0.900	0.936	0.953
1	0.644	0.378	0.471	0.784	0.892	0.929	0.949
1.25	0.608	0.342	0.430	0.764	0.871	0.912	0.937
1.6	0.530	0.264	0.347	0.722	0.726	0.874	0.912
2	0.428	0.159	0.262	0.663	0.164	0.819	0.874
2.5	0.331	0.051	0.248	0.298	0.697	0.753	0.825
3.15	0.275	0.002	0.344	0.537	0.633	0.681	0.765
4	0.266	0.115	0.379	0.481	0.563	0.596	0.685
5	0.293	0.133	0.354	0.427	0.500	0.510	0.596
6.3	0.285	0.147	0.373	0.387	0.454	0.418	0.502
8	0.271	0.137	0.309	0.338	0.406	0.359	0.425
10	0.164	0.064	0.343	0.188	0.363	0.310	0.375
12.5	0.170	0.259	0.251	0.121	0.361	0.288	0.316
<b>MTI</b>	0.433	0.259	0.416	0.524	0.615	0.639	0.689

STI Value = 0.523

L'ultimo aspetto che riguarda il parlato e che occorre sottolineare, concerne il rapporto che intercorre tra la potenza sonora di un messaggio vocale e la sua intelligenza.

Della potenza sonora totale di un messaggio vocale, circa il 90-95% giace nella porzione di spettro al di sotto dei 1.000 Hz; di converso questa regione dello spettro contribuisce solo per il 30% all'intelligenza. Questa relazione peggiora ancora se si scende in frequenza; al di sotto dei 500 Hz è contenuto il 60% del contributo energetico del parlato ma solo il 10% dell'intelligenza. Il grafico seguente consente di porre in relazione i due aspetti.



La ragione di ciò va ricercata nel fatto che la maggior parte della potenza sonora del parlato è contenuta nelle vocali, mentre la maggior parte del significato (e quindi dell'intelligibilità) è contenuta nelle consonanti.

Nella tabella seguente mostriamo con un semplice esempio, come, lasciando di un testo da un lato solo le vocali, dall'altro solo le consonanti, la probabilità di ricostruire il testo originale cambi radicalmente; l'esempio seguente chiarisce in modo evidente questo concetto.

Solo vocali

**A oeea ie aa aaa**

Solo consonanti

**L dnzlltt vn dll cmpgn**

**Testo completo**

**La donzelletta vien dalla campagna**

Al fine di aiutare a comprendere come l'intelligibilità dipenda in modo sostanziale dal rumore ambientale e dal riverbero, di seguito riportiamo 3 tabelle relative al calcolo previsionale del valore di STI in un ambiente (lo stesso di cui più oltre mostreremo l'esito delle simulazioni) in 3 distinte situazioni:

**A. Condizione iniziale**

**Bassa rumorosità (NC-25) ambientale e tempo di riverbero contenuto**

**B. Variante 1**

**Bassa rumorosità (NC-25) e tempo di riverbero elevato**

**C. Variante 2**

**Tempo di riverbero contenuto ed elevata rumorosità ambientale (NC-50)**

**Come si vedrà, a parità di distanza sorgente-ricettore e a parità di variazione nel tempo di riverbero e nel rumore ambientale, il valore di STI è più sensibile all'influenza negativa del rumore che non a quella del tempo di riverbero.**

Questo risultato ci sarà utile più oltre quando descriveremo i sistemi di Sound Masking.

## Caso 1: Condizione Iniziale

Octave Band	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
Reverberation Time	1.5	1.4	1.2	0.9	0.7	0.6	0.5
Background Noise Level (NC-25)	44.0	37.0	31.0	27.0	24.0	22.0	21.0
Voice Level (Leq, 1 m free field)	72.0	72.5	74.0	68.0	62.0	57.0	55.0
Distance	5	m					
Room Volume	1680	m <sup>3</sup>					
Octave Band STI	0.385	0.406	0.444	0.514	0.579	0.625	0.658
Octave Band Weighting	0.13	0.14	0.11	0.12	0.19	0.17	0.14
Speech Transmission Index	0.53	Fair Speech Intelligibility					

## Caso 2: Elevato valore di RT

Octave Band	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
Reverberation Time	3	2.8	2.4	1.8	1.4	1.2	1
Background Noise Level (NC-25)	44.0	37.0	31.0	27.0	24.0	22.0	21.0
Voice Level (Leq, 1 m free field)	72.0	72.5	74.0	68.0	62.0	57.0	55.0
Distance	5	m					
Room Volume	1680	m <sup>3</sup>					
Octave Band STI	0.290	0.307	0.340	0.402	0.460	0.502	0.533
Octave Band Weighting	0.13	0.14	0.11	0.12	0.19	0.17	0.14
Speech Transmission Index	0.41	Poor Speech Intelligibility					

## Caso 3: Elevato rumore ambientale

Octave Band	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
Reverberation Time	1.5	1.4	1.2	0.9	0.7	0.6	0.5
Background Noise Level (NC-25)	64.0	58.0	54.0	51.0	49.0	48.0	47.0
Voice Level (Leq, 1 m free field)	72.0	72.5	74.0	68.0	62.0	57.0	55.0
Distance	5	m					
Room Volume	1680	m <sup>3</sup>					
Octave Band STI	0.289	0.366	0.408	0.433	0.418	0.348	0.326
Octave Band Weighting	0.13	0.14	0.11	0.12	0.19	0.17	0.14
Speech Transmission Index	0.37	Poor Speech Intelligibility					

## 2 Quali requisiti acustici per gli Uffici?

In questa seconda parte cercheremo di stabilire quali siano i descrittori acustici più idonei per caratterizzare la condizione acustica di un «ufficio».

Ovviamente daremo per scontato che sia garantito il rispetto dei requisiti acustici fissati dal DPCM 5/12/1997 per gli ambienti di Categoria B (uffici ed assimilabili); fatta però eccezione per i descrittori acustici coinvolti da questo decreto (isolamento di facciata, livello di calpestio, ecc. ecc.), scarseggiano fonti legislative, normative o dati di letteratura che fissino i valori di riferimento per la qualità acustica interna degli uffici.

In altre parole, ad oggi non è dato di sapere con ragionevole certezza e uniformità di pareri, cosa sia «importante» dal punto di vista acustico per un ufficio. Per cercare una risposta occorre però fissare alcuni punti fondamentali:

A. Così come non esiste un valore «ideale» del tempo di riverbero, anche per gli uffici le esigenze di natura acustica presentano una significativa variabilità in funzione delle loro dimensioni e forma, nonché della tipologia di attività che vi si svolge (un call centre ha esigenze acustiche diverse da un ufficio tecnico o da un ufficio marketing)

B. Come per qualsiasi altro ambito di acustica architettonica, non è ragionevole ipotizzare che la qualità acustica di un ufficio dipenda dal valore assunto da un descrittore unico; l'esito conclusivo sarà il risultato di una combinazione di valori e parametri che in alcuni casi, come vedremo, possono essere anche in contrasto tra loro.

Per cercare di muoversi da questa situazione di impasse, occorre allora seguire un approccio diverso.

A questo scopo di particolare ausilio risulta un recente articolo (aprile 2020) che riporta la sintesi e le successive analisi di una campagna di sondaggi eseguiti nell'arco di 20 anni dal CBE (Centre for the Built Environment) dell'Università della California di Berkeley (<https://cbe.berkeley.edu/>), 20 anni durante i quali sono stati raccolti i più di 90.000 pareri individuali di soggetti operativi negli uffici di oltre 900 edifici distinti.

Si tratta di un campione statistico decisamente rilevante i cui esiti possono essere assunti con solida certezza come rappresentativi della realtà acustica così come percepita da parte di chi lavora nell'ambiente «ufficio».

Di seguito riportiamo gli estratti di alcuni tra i grafici più significativi contenuti all'interno del citato documento; possiamo però anticipare fin da subito che l'acustica degli spazi riveste un ruolo fondamentale nel definire non solo il gradimento dello spazio «ufficio» da parte di chi ci lavora, ma anche, e soprattutto, nel garantire un'efficace produttività.

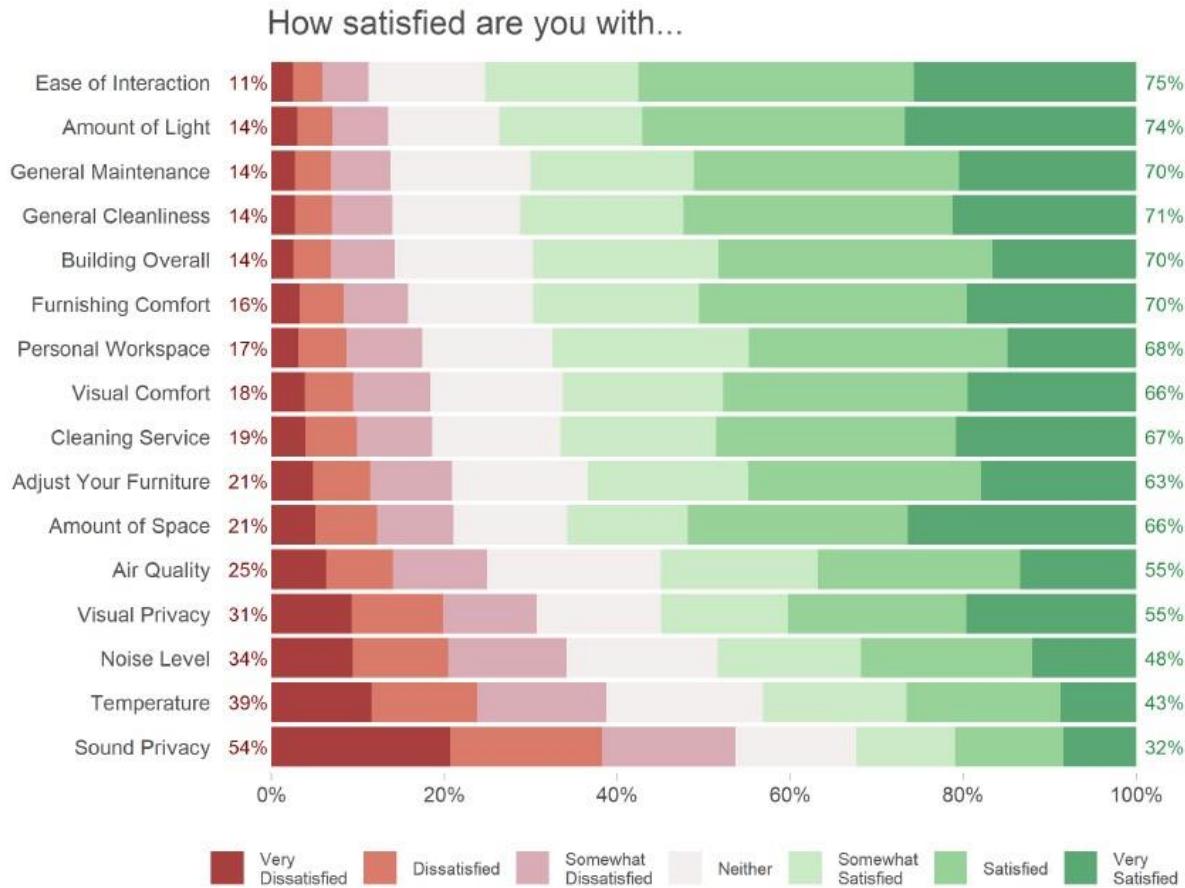


Figure 2. Votes for the 16 satisfaction items in the CBE Occupant Survey. N = 897 buildings and 84,366 respondents. Numbers colored red to the left of the bars count the percentage of dissatisfied votes (1 – 3) and the numbers colored green to the right of the bars count the percentage of satisfied votes (5 – 7).

The CBE Occupant Survey has nine additional questions designed to determine if aspects of the workspace enhance or interfere with occupants' self-reported productivity. The results in Figure 3 show that acoustical quality has the largest negative impact on self-reported productivity (39% dissatisfied) followed by temperature (35%). Roughly two fifths of building occupants think acoustical quality and temperature interferes with their ability to get their job done. Almost one quarter of respondents said that the office layout interfered with their ability to get their job done, which is likely related to perceptions of privacy and amount of space satisfaction.

Does...enhance or interfere with your ability to get your job done?

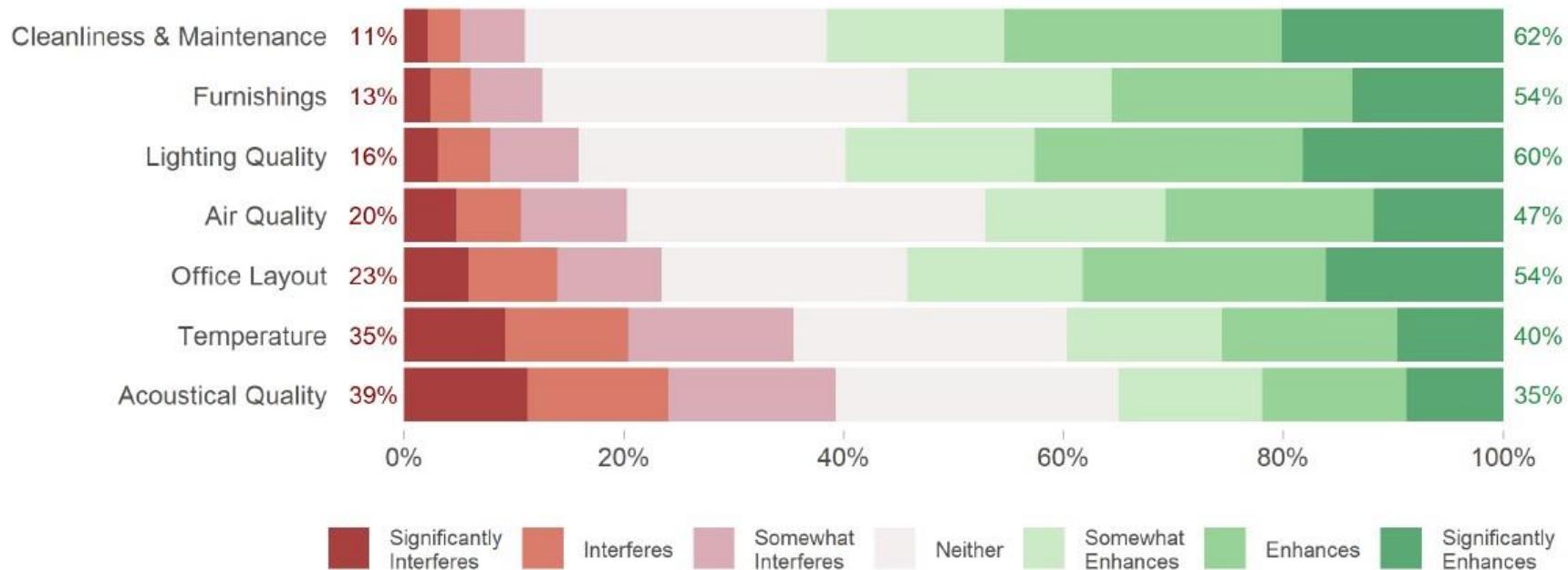


Figure 3. Votes for the 7 self-reported productivity (i.e., “enhance/interfere”) items in the CBE Occupant Survey. N = 897 buildings and 79,137 respondents in the CBE Occupant Survey. Numbers colored red to the left of the bars count the percentage of votes for interfere (1 – 3) and the numbers colored green to the right of the bar count the percentage of votes for enhance (5 - 7).

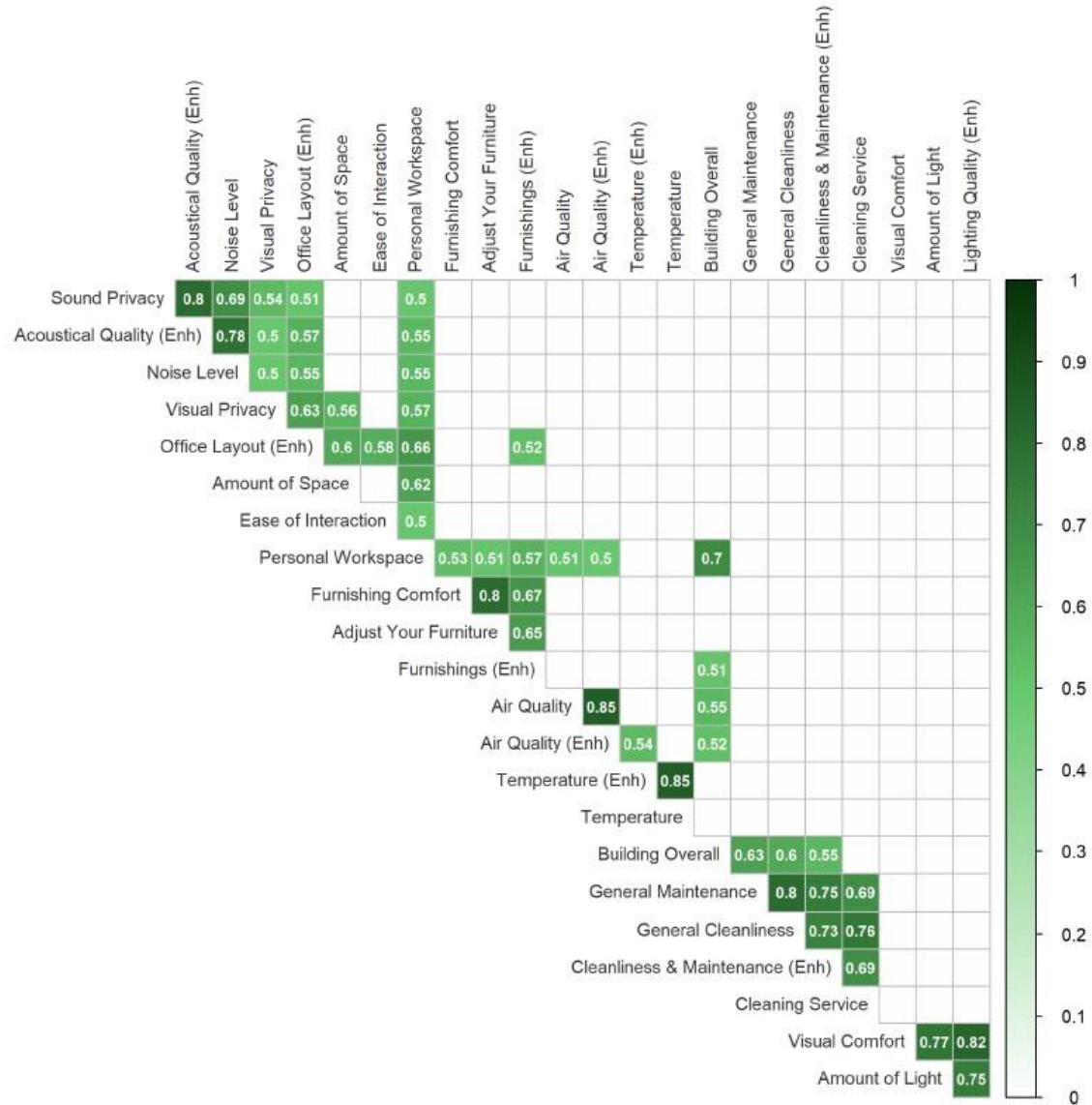


Figure 4. Correlation matrix of the 16 satisfaction items and 7 enhance or interfere items (labels with the "Enh" suffix) based on pairwise complete observations. Items are arranged by the angular order of eigenvectors and only moderate (0.5-0.8) and strong ( $>0.8$ ) correlations are shown for legibility.

# Where do we go now? Lessons learned from 20 years of CBE's Occupant Survey

Lindsay T. Graham, Thomas Parkinson, Stefano Schiavon

Center for the Built Environment, University of California, Berkeley, United States

Corresponding author:

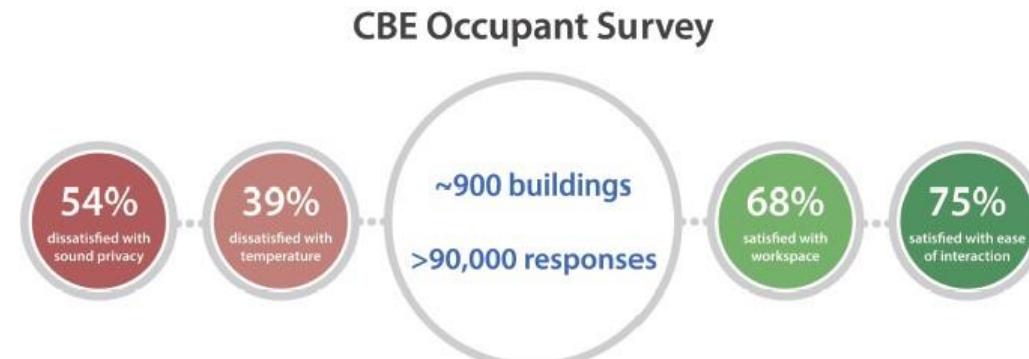
Lindsay T. Graham; [lindsaytgraham@gmail.com](mailto:lindsaytgraham@gmail.com)

Center for the Built Environment  
390 Wurster Hall #1839  
Berkeley CA 94720-1839

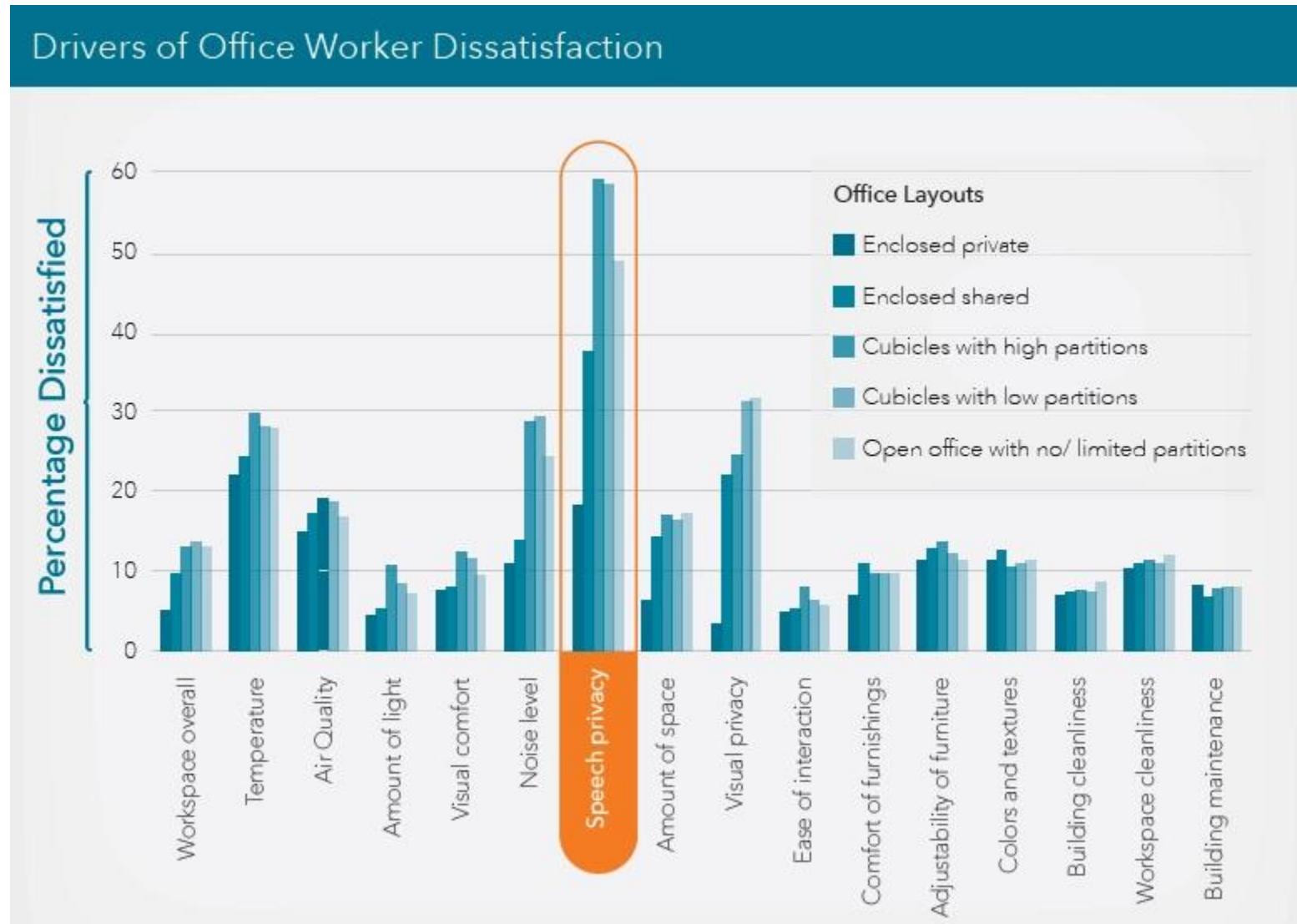
## Abstract

Built spaces have the potential to influence a diverse set of factors like health, well-being, productivity, and social connection. However, most post occupancy evaluations (POE) focus solely on measuring people's levels of comfort and satisfaction with their indoor environment. With increasing attention and interest in occupant wellness and productivity, there is a need to reassess whether occupant surveys are evaluating all they need to. One of the most widely used online POE tools is the Center for the Built Environment's Occupant Survey. We analyzed data collected from this tool over the last two decades (>90,000 respondents from ~900 buildings) to summarize the database and evaluate the survey structure. 68% of the respondents are satisfied with their workspace. People are most satisfied with spaces' ease of interaction (75% satisfied), amount of light (74%) and the cleanliness (71%), and most dissatisfied with sound privacy (54% dissatisfied), temperature (39%) and noise level (34%). Correlation, principal component, and hierarchical clustering analyses identified seven distinct categories of measurement within the 16 satisfaction items. Results also revealed that some items correlate strongly with one another, suggesting reduction in the scale may be possible. Based on these results, we discuss potential improvements and new directions for the future of POE tools.

## Graphical Abstract



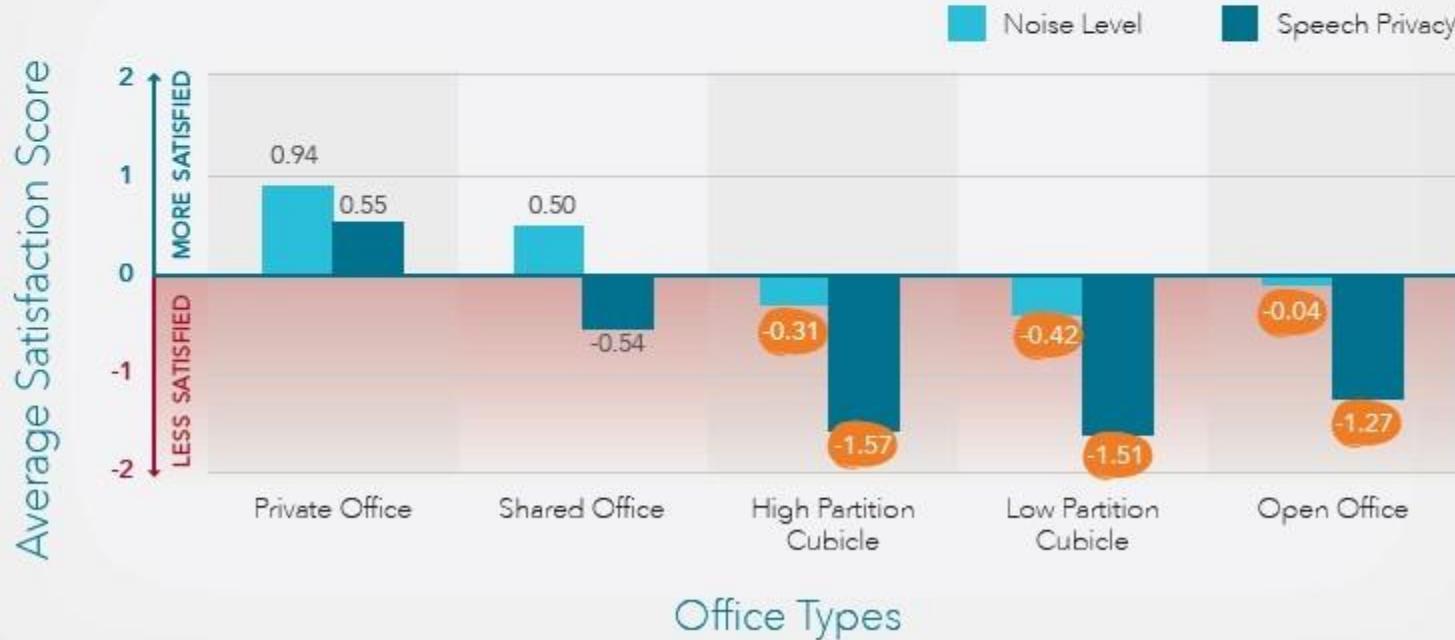
Qui riportiamo altri due grafici relativi ad un altro sondaggio, così come riportati nel manuale «*Sound Masking 101*» della Cambridge Sound Management.



## Sound Masking Increases Worker Satisfaction

Approximately 24,000 office workers in private offices, shared offices, cubicles, and open offices were asked to rate their satisfaction with their noise and speech privacy levels. Those with private offices were the only ones satisfied with their speech privacy, and even they only rated them a .55 out of 2 on average.

### How Satisfied Are You With Your Office's Acoustics?



Appare quindi evidente come la qualità acustica rivesta un ruolo fondamentale nella percezione soggettiva dello spazio «ufficio» e come, ancor più della variabile «rumore», sia la sensazione di **Privacy Acustica** (o meglio la sua assenza) ad essere percepita come l'elemento più rilevante.

Pertanto se, all'interno di un determinato ufficio, il livello di rumore e il tempo di riverbero rappresentano descrittori oggettivamente importanti e da tenere sotto controllo, è altrettanto fondamentale avere chiaro il ruolo giocato dal concetto di «privacy acustica». Ciò è tanto più vero se si pensa che, in un certo senso, rumore e riverbero giocano per la privacy acustica un ruolo sostanzialmente capovolto rispetto a quello che rivestono per l'intelligibilità.

Se infatti un trattamento fonoassorbente è necessario per diminuire la riverberazione e di conseguenza il livello del rumore ambientale, dall'altro lo stesso tipo di intervento incrementa l'intelligibilità e consente quindi non solo la percezione, ma anche la comprensione di un discorso pronunciato anche a distanza rilevante dalla postazione di lavoro: le conseguenze a carico della concentrazione e della produttività sono facilmente intuibili.

Parimenti la sensazione che una propria conversazione privata possa essere agevolmente ascoltata e compresa da soggetti terzi rappresenta un vulnus potenzialmente grave, soprattutto in situazioni in cui la riservatezza di determinati colloqui è essenziale.

Per una maggiore comprensione di quanto detto poc'anzi si osservi la tabella seguente:

STI	Speech intelligibility	Speech privacy	Examples in offices
0.00 – 0.05	Very bad	Confidential	Between two single person rooms, high sound insulation.
0.05 – 0.20	Bad	Good	Between two single person rooms, normal sound insulation.
0.20 – 0.40	Poor	Reasonable	Between two workstations in a high level open plan office. Between two single person rooms, doors open.
0.40 – 0.60	Fair	Poor	Between desks in a well designed open plan office.
0.60 – 0.75	Good	Very poor	Between desks in an open plan office with reasonable acoustic design.
0.75 – 0.99	Excellent	None	Face to face discussion, good meeting rooms. Between desks in an open plan office, no acoustical design.

Fonte: «A guide to Office Acoustics» - [www.thefis.org](http://www.thefis.org) – [www.acousticguide.org](http://www.acousticguide.org)

Ci troviamo quindi di fronte ad una situazione in cui la soluzione consiste non nell'ottimizzazione di uno o più descrittori acustici (riverbero, chiarezza, intelligibilità), ma bensì nella ricerca di un corretto bilanciamento tra requisiti contrastanti, per non dire opposti. Occorre quindi individuare qualche nuovo descrittore acustico che ci consenta di valutare se il nostro ufficio è adeguatamente rispettoso della privacy acustica.

A tale scopo risulta di fondamentale importanza quanto introdotto e definito all'interno della **UNI EN ISO 3382-3 (2012)** «*Misurazione dei parametri acustici degli ambienti. Parte 3: Open Space*». Tale norma introduce infatti i seguenti fondamentali descrittori acustici:

- 1. Indice di attenuazione spaziale del parlato,  $D_{2,s}$  (dB)**
- 2. Il livello ponderato A della pressione sonora del parlato ad una distanza di 4 m,  $L_{P,A,S,4m}$  (dBA)**
- 3. Distanza di disattenzione,  $r_D$  (m)**
- 4. Distanza di privacy,  $r_P$  (m)**

descrittori che consentono di caratterizzare la qualità acustica di un ufficio (nello specifico un open office, ma i concetti sono utilizzabili per qualsiasi altra tipologia di ufficio) così come viene sostanzialmente percepita dai suoi occupanti.

## Indice di attenuazione spaziale del parlato, $D_{2,s}$

E' un descrittore che misura l'attenuazione del parlato al raddoppio della distanza; la sua unità di misura è il dB.

Uno **scarso** valore di  $D_{2,s}$  sta a significare che se raddoppiamo la distanza dalla sorgente del parlato (voce o altoparlante), il relativo livello sonoro diminuisce poco e di conseguenza la privacy acustica è compromessa, ergo

Bassi valori di  $D_{2,s}$  corrispondono a bassi valori di privacy.

La norma esplicitamente evidenzia come negli Open Office le condizioni acustiche sono generalmente scarse o insufficienti e individua come obiettivo di qualità per questo descrittore la seguente relazione:

$$D_{2,s} \geq 7 \text{ dB}$$

## Indice di attenuazione spaziale del parlato, $D_{2,s}$

$D_{2,s}$  si ottiene effettuando una serie di misure dove la sorgente di rumore (altoparlante omnidirezionale che emette rumore rosa) viene collocata in almeno due postazioni distinte, dopodiché si procede a registrare il livello sonoro rilevabile in punti di misura a distanze progressivamente crescenti lungo un percorso rettilineo oppure non rettilineo. Di seguito riportiamo un esempio, tratto dalla UNI EN ISO 3382-3, di due percorsi di misurazione.



## Indice di attenuazione spaziale del parlato, $D_{2,s}$

Nel caso di ambienti semplici è possibile stimare l'entità di  $D_{2,s}$  a partire dai dati geometrici dell'ambiente e dalla conoscenza di alcuni parametri acustici di input. Siano dati i seguenti elementi:

Parametro	Simbolo	unità di misura
Lunghezza Ambiente	L	metri
Larghezza Ambiente	W	metri
Altezza ambiente	H	metri
Altezza schermi	h	metri
Assorbimento medio del soffitto	$\alpha_c$	
Assorbimento medio degli arredi	$\alpha_f$	

N.B. per «assorbimento medio» si intende qui la media dei valori assunti dal coefficiente di assorbimento nelle bande di ottava da 250 Hz a 4 kHz.

## Indice di attenuazione spaziale del parlato, $D_{2,s}$

La formula empirica<sup>[1]</sup> con la quale è possibile stimare il valore di  $D_{2,s}$  è la seguente:

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

Ponendo:

$L = 20 \text{ m}$

$W = 12 \text{ m}$

$H = 5 \text{ m}$

$h = 1 \text{ m}$

$\alpha_c = 0.5$

$\alpha_f = 0.2$

si ottiene



$$D_{2,s} = 4.6 \text{ dB}$$

Mantenendo invariate tutte le altre variabili, se incrementiamo l'altezza dello schermo da 1 a 1,5 m si ottiene:

$$D_{2,s} = 5.4 \text{ dB}$$

**Questo risultato evidenzia l'importanza dell'introduzione, negli ambienti Open Space, di elementi schermanti**

<sup>[1]</sup> Valtteri Hongisto, Juka Keranen, «*Prediction of spatial decay of speech in open plan offices applying ISO 3382-3 principles*», EuroNoise 2015

## Livello di pressione sonora del parlato alla distanza di 4 m, $L_{P, A, S, 4 m}$

E' un descrittore che misura il livello di pressione sonora del parlato quando, all'interno dell'ufficio oggetto di indagine, ci si porta ad una distanza di 4 metri dall'oratore o dalla sorgente normalizzata del parlato (bocca artificiale).

Un valore **elevato** di  $L_{P, A, S, 4 m}$  significa che il livello sonoro di un messaggio vocale risulta eccessivo (e quindi intelligibile) anche a 4 metri di distanza dalla sorgente; conseguentemente la privacy acustica risulterà esigua:

Elevati valori di  $L_{P, A, S, 4 m}$  corrispondono a bassi valori di privacy

La norma esplicitamente evidenzia come negli Open Office le condizioni acustiche sono generalmente scarse o insufficienti e individua come obiettivo di qualità per questo descrittore la seguente relazione:

$L_{P, A, S, 4m} \leq 48 \text{ dBA}$

## Livello di pressione sonora del parlato alla distanza di 4 m, $L_{P, A, S, 4 m}$

Anche per quanto concerne il descrittore  $L_{P, A, S, 4 m}$  esiste una formula empirica<sup>[2]</sup> analoga alla precedente che permette di stimarne il valore a partire da pochi dati geometrici e acustici di partenza. La formula è la seguente:

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

dove  $L_{A,S,1 m}$  è il livello del parlato ponderato A ad 1 m di distanza.

Nel caso di una conversazione «normale» (ossia non a voce alta) vale:

$$L_{A,S,1 m} = 57,4 \text{ dBA}$$

Utilizzando i dati di input dell'esempio precedente, per schermi di altezza pari a 1 e 1,5 m rispettivamente, si ottengono i seguenti risultati:

$$L_{A,S,4 m,h 1} = 50,7 \text{ dBA}$$

$$L_{A,S,4 m,h 1,5} = 49,2 \text{ dBA}$$

Anche in questo caso l'effetto positivo derivante dall'introduzione di uno schermo è evidente.

<sup>[2]</sup> Valtteri Hongisto, Juka Keranen, *cit.*

## Distanza di disattenzione, $r_D$

E' la distanza al di sopra della quale l'indice di trasmissione del parlato (**STI**) scende al di sotto del valore **STI = 0.50**; ricordando quanto detto in precedenza, il valore 0.50 rappresenta il valore soglia che separa l'intelligibilità sufficiente da quella scarsa.

Valori elevati di  $r_D$  indicano che l'intelligibilità permane a livelli elevati anche a distanze significative; ciò significa che:

Maggiore è  $r_D$ , minore è la privacy.

La norma esplicitamente evidenzia come negli Open Office le condizioni acustiche sono generalmente scarse o insufficienti e individua come obiettivo di qualità per questo descrittore la seguente relazione

$$r_D \leq 5 \text{ m}$$

## Distanza di privacy, $r_D$

E' la distanza al di sopra della quale l'indice di trasmissione del parlato scende al di sotto del valore **STI = 0.20**. Ricordando quanto detto in precedenza, a tale valore (0.20) corrisponde una intelligenza ampiamente insufficiente e di conseguenza un privacy acustica ottima.

A differenza dei tre descrittori precedenti, per quanto riguarda quest'ultimo non esiste una indicazione di qualità; ciò è sostanzialmente dovuto al fatto che la condizione

$$STI \leq 0.20$$

praticamente non è mai riscontrabile in un ufficio.

Un ufficio caratterizzato da simili valori risulterebbe pressoché «invivibile» dal punto di vista acustico o a causa di una riverberazione elevatissima, o di rumorosità inaccettabili o una combinazione di entrambe le cause, a meno che tra le varie postazioni di lavoro non siano presenti partizioni ad elevato isolamento acustico (box singoli isolati).

Nella tabella successiva mostriamo una sintesi di quelli che, per i vari descrittori acustici fin qui introdotto, potrebbero essere assunti come valori obiettivo da conseguire, in funzione della tipologia di ufficio, così come riportato nel progetto di norma ISO/DIS 22955 «Acoustic quality of open office spaces».

Tipo di Ufficio	LAeq	RT	D <sub>2, S</sub>	L <sub>P, A, S, 4 m</sub>
Call Centre	≤ 55	≤ 0.5	≥ 7	≤ 47
Uffici con attività prevalentemente collaborative	≤ 55	≤ 0.5	≥ 8	≤ 48
Uffici con attività prevalentemente individuali	≤ 48	≤ 0.5	≥ 7	≤ 47

Fonte: ISO/DIS 22955 (en)

Nella tabella seguente riteniamo utile mostrare, in un unico quadro sinottico, un confronto tra gli standard acustici previsti in alcuni paesi europei

Paese	Francia			Germania			Finlandia		
Tipologia di Ufficio	1	2	3	1	2	3	1	2	3
D <sub>2,5</sub>	> 7	> 9	> 7	≥ 8	≥ 6	4 – 6	> 11	9 – 11	7 – 9
L <sub>P,A,S,4m</sub>	-	-	-	≤ 47	≤ 49	≤ 51	< 48	48 – 51	51 – 54
RT	< 0.6	< 0.6	< 0.6	< 0.6	< 0.7	< 0.9	-	-	-
r <sub>D</sub>	-	-	-	-	-	-	< 5	5 – 8	8 - 11
L <sub>Aeq</sub>	48 – 52	45 – 50	40 – 45	≤ 35	≤ 40	≤ 40	-	-	-

Fonte: F. Larrieu, J. Harvie-Clark, «*Contrasting Open Plan Office Design Implications from Emerging French, German and Finnish Standards*» - ICSV24, 2017

La UNI EN ISO 3382:3, è una norma tecnica che fissa la metodologia per l'esecuzione delle misure e dei calcoli necessari a determinare i valori dei descrittori precedentemente introdotti.

Nell'Appendice B viene però trattata anche la relazione che intercorre tra l'indice di trasmissione del parlato e le prestazioni lavorative; si tratta di una relazione che in ambito anglosassone (UK, USA, ecc.) è nota e studiata da tempo, ma che in ambito europeo è stata per lungo tempo vista con un certo scetticismo fino a che questa norma non ha finalmente colmato la lacuna. In particolare la norma UNI stabilisce che:

1. Il parlato costituisce per gli uffici la più fastidiosa e rumorosa delle sorgenti sonore
2. Se il lavoro richiede concentrazione, le conversazioni intelligibili circostanti costituiscono fattore di distrazione e influiscono sulle prestazioni lavorative
3. Le conversazioni confidenziali possono risultare impossibili
4. Studi consolidati hanno dimostrato che una conversazione perfettamente intelligibile riduce in modo significativo le prestazioni dei compiti impegnativi. In presenza di conversazioni intelligibili i tassi di errore nei compiti impegnativi mostrano incrementi compresi tra il 4% e il 41% rispetto ad una situazione di silenzio. La variabilità nei tassi di errore dipende da numerosi fattori (tipo di compito, tipi di conversazione, pressioni esterne quali scadenze o tempi di consegna, ecc.) ma tutti gli esiti sperimentali convergono nel correlare disturbo da parlato e calo di prestazione produttiva.

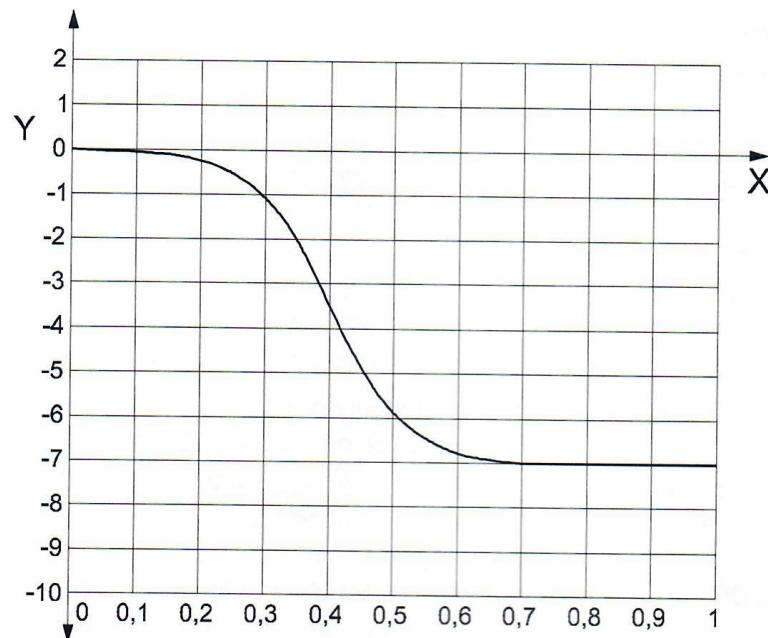
Al termine dell'appendice la norma introduce un grafico (riportato qui sotto) che correla il cambiamento nelle prestazioni lavorative con il valore di STI, grafico che va interpretato in senso puramente qualitativo; in altri termini viene riportata la forma del cambiamento nella prestazione non il suo valore assoluto, in quanto quest'ultimo, come detto poc' anzi, dipende in modo essenziale dai fattori esterni precedentemente citati (tipo di lavoro, tipo di conversazione, ecc.).

figura B.1 L'effetto del valore STI sulle prestazioni dei compiti impegnativi dal punto di vista cognitivo (vedere riferimento [8])

Legenda

Y Cambiamento minimo nelle prestazioni del compito (%)

X Indice di trasmissione del parlato



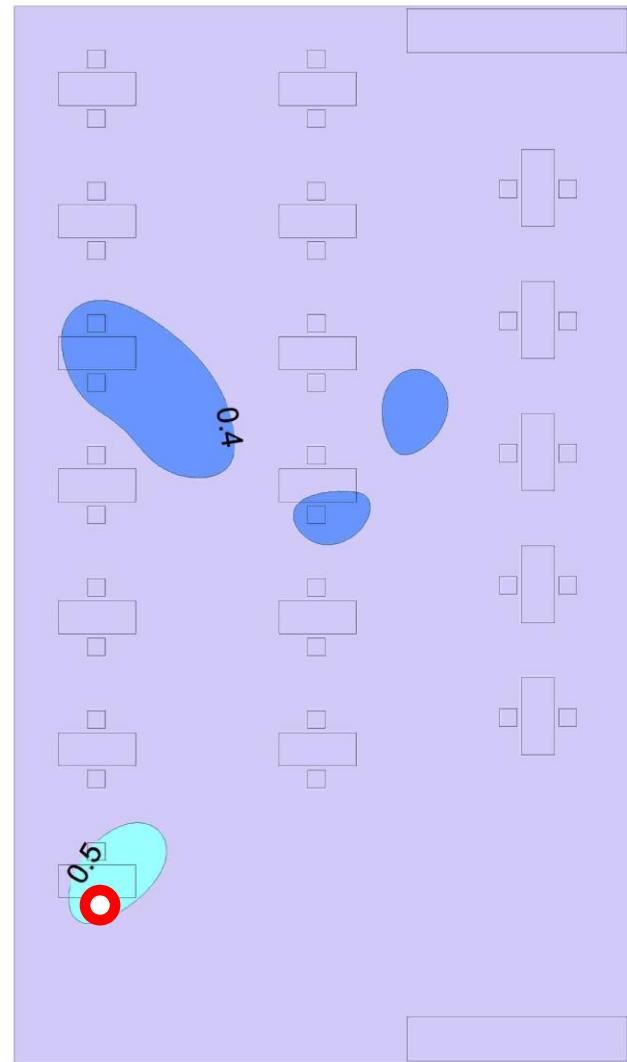
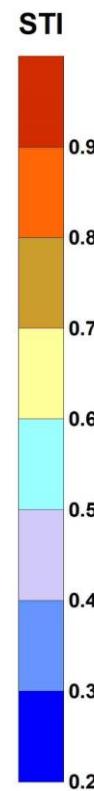
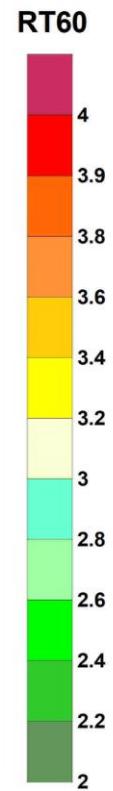
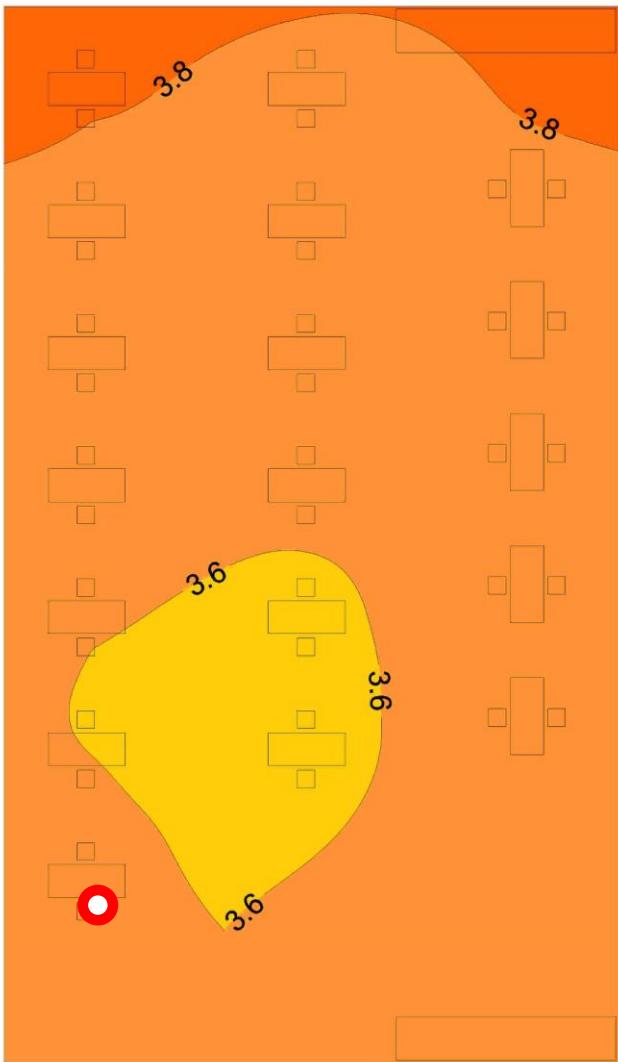
## ESEMPIO CONCRETO

Di seguito mostriamo due figure contenenti le mappature esito di simulazioni acustiche eseguite su un recente progetto.

- Nella prima è raffigurata la situazione della condizione iniziale dove non è previsto alcun trattamento acustico; a sinistra è riportata la distribuzione spaziale del tempo di riverbero mentre a destra il parametro raffigurato è l'indice STI.
- Nella seconda figura si riportano le mappature degli stessi descrittori a seguito di un intervento di correzione acustica «tradizionale», consistente cioè nell'adozione di un massiccio trattamento fonoassorbente a soffitto.

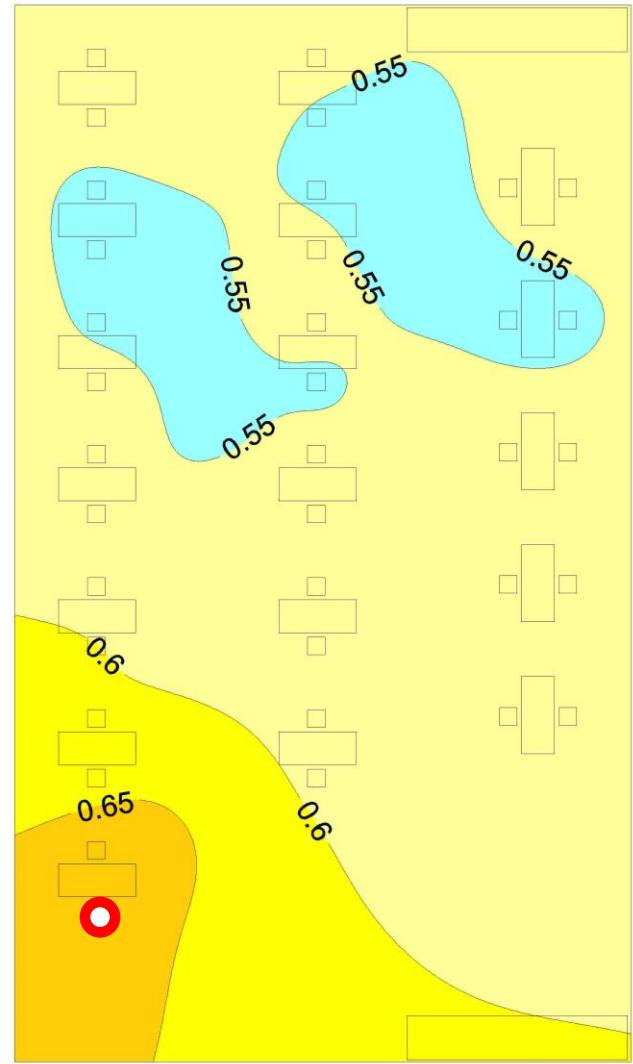
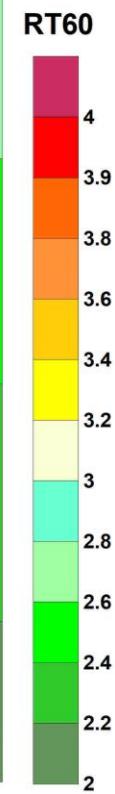
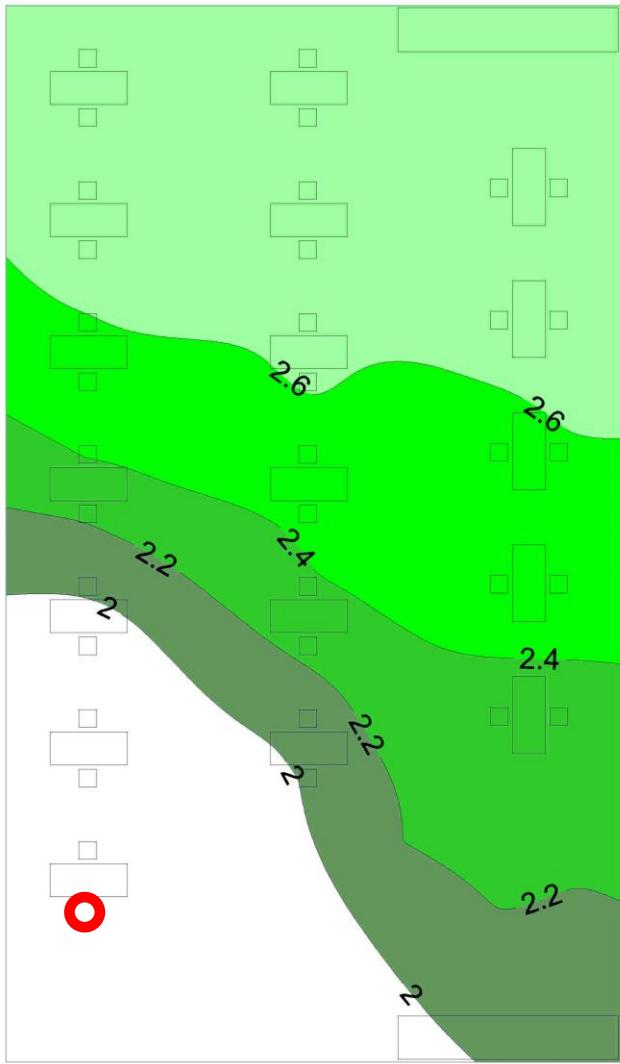
E' bene precisare che le simulazioni sono state condotte nelle stesse condizioni che la UNI EN ISO 3382:3 impone per l'esecuzione delle misure, ossia:

- **Ambiente completamente arredato ma vuoto** (cioè privo di persone).
- **Uso di una sorgente sonora omnidirezionale** (tiene conto che le persone non parlano continuamente in una direzione fissa).
- *Sistema di Sound Masking attivo, se presente.*



Open Office - Superficie in pianta = 336 mq

Condizione: ambiente vuoto - nessun trattamento acustico



Open Office - Superficie in pianta = 336 mq

Condizione: ambiente vuoto - trattamento acustico a soffitto

Come è possibile osservare nessuna delle due condizioni rappresenta una condizione ottimale per quanto concerne l'acustica. Infatti:

- Nella situazione iniziale, ci troviamo sì con un elevato rispetto della privacy (mappa di destra con  $STI \leq 0.50$  quasi ovunque), ma con una riverberazione assolutamente inaccettabile che comporterebbe la presenza di una rumorosità ambientale continuamente elevata e quindi incompatibile con una adeguata condizione lavorativa.
- Nella seconda situazione, possiamo osservare come il trattamento acustico a soffitto riporti sì il tempo di riverbero verso valori più corretti (ricordiamo che l'ambiente è privo di persone), ma di converso l'intelligibilità aumenta a tal punto che la condizione di privacy acustica risulta ora confinata solamente in due piccolissime aree.

Appare quindi evidente come un approccio acustico «tradizionale» non sia in grado di bilanciare adeguatamente le due opposte esigenze di avere un ambiente lavorativo scarsamente riverberante e quindi poco rumoroso e al contempo una sensazione di privacy acustica adeguata.

Si pone quindi il problema di capire in cosa possa consistere un approccio corretto e come questo si traduca in azioni concrete.

Prima di illustrare una possibile soluzione alla situazione in oggetto, è bene premettere che una risposta univoca alla precedente domanda «cosa è possibile fare?» non esiste e, oltretutto, le risposte non sono tutte di natura acustica; ritorneremo su questo punto più oltre.

E' però possibile introdurre elementi che consentono un miglioramento della condizione acustica complessiva senza incidere negativamente sui risultati positivi raggiunti con l'adozione del soffitto fonoassorbente.

Per affrontare infatti queste situazioni nel corso degli ultimi due decenni si è sviluppato un approccio metodologico noto con l'acronimo **ABC** dove le lettere riassumono le 3 distinte direzioni che bisogna seguire per cercare di risolvere il problema, ossia:

### **A = Absorbing**

Occorre introdurre unità acusticamente assorbenti

### **B = Blocking**

E' necessario «bloccare» la libera propagazione dei fronti d'onda

### **C = Covering**

E' «utile» introdurre un sistema elettroacustico che introduca nell'ambiente uno spettro sonoro attuato a «mascherare» il parlato (Sound Masking).

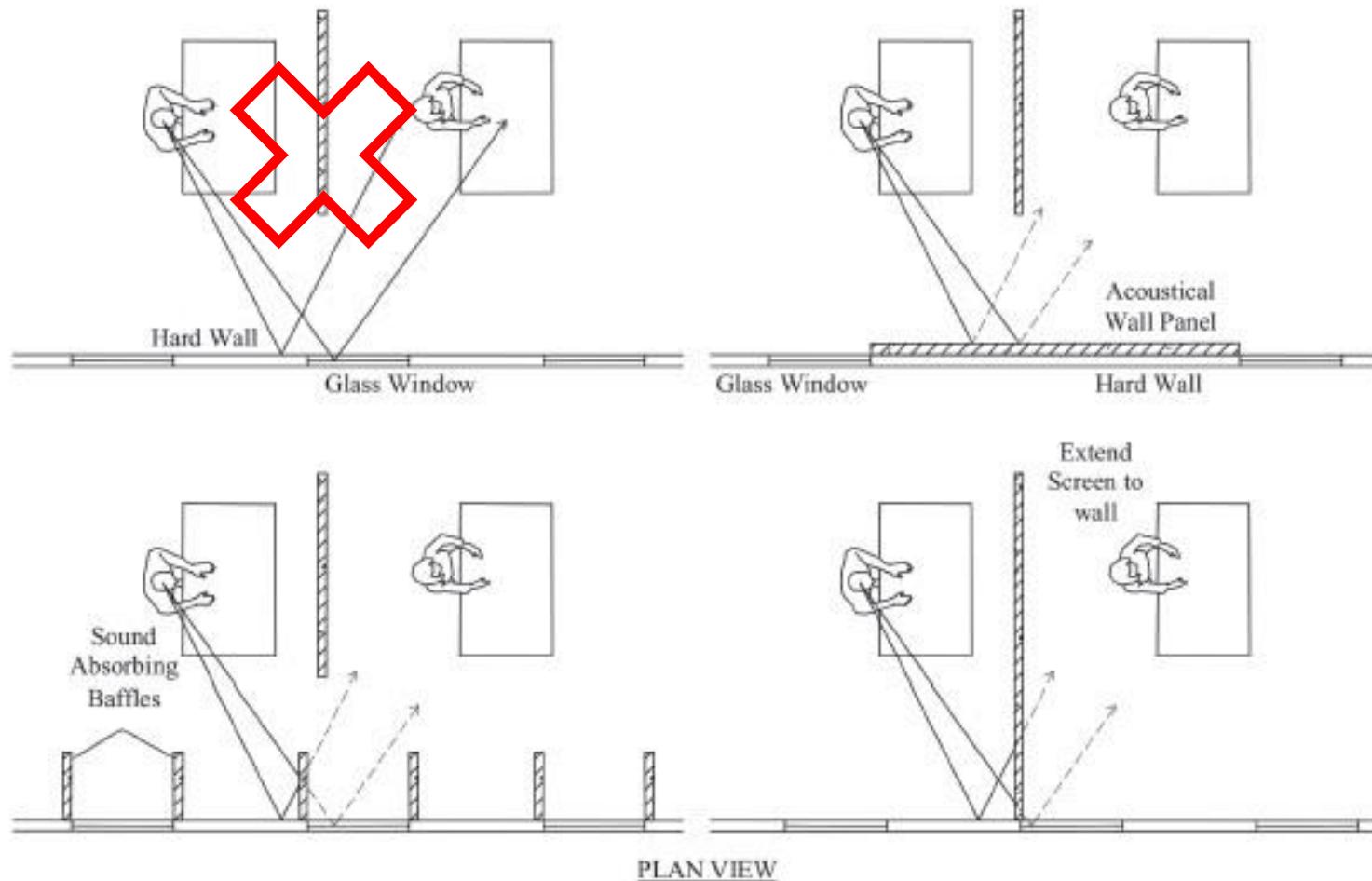
Per quanto concerne il termine **A** (assorbimento) non reputiamo necessario richiamare concetti che riteniamo essere ampiamente noti.

Nella categoria **B** (blocking), rientrano tutti quegli interventi che sono finalizzati a «rompere» la libera propagazione dei fronti d'onda; ciò può avvenire mediante l'introduzione non solo di schermi acustici, ma anche tramite l'inserimento di elementi di arredo (armadiature) o attraverso una diversa configurazione dello spazio (irregolarizzazione della geometria, introduzione di zone silenti, ecc.).

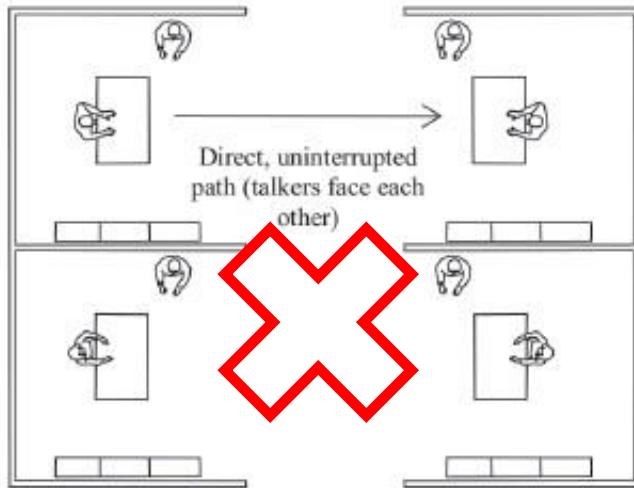
Il termine **C** (covering) fa invece esplicito riferimento all'introduzione nell'ambiente di uno specifico dispositivo noto come **Sound Masking** e che, da un punto di vista «logico», risulta costituito da tre parti:

- Una parte ricevente, costituita da uno o più microfoni il cui scopo è quello di monitorare il rumore ambientale onde fornire alla centralina le informazioni necessarie per settare il livello di amplificazione e l'equalizzazione/filtraggio del segnale di mascheramento
- Una centralina di controllo che ha la funzione di ricevere le informazioni relative al rumore ambientale (provenienti dai microfoni), correggere e settare il segnale di mascheramento e, infine, inviarlo agli speaker
- Un certo numero di altoparlanti (speaker) disposti opportunamente nell'ambiente, aventi lo scopo di diffondere un rumore il cui spettro è specificamente tarato per andare a mascherare la porzione del parlato contenente il massimo dell'informazione

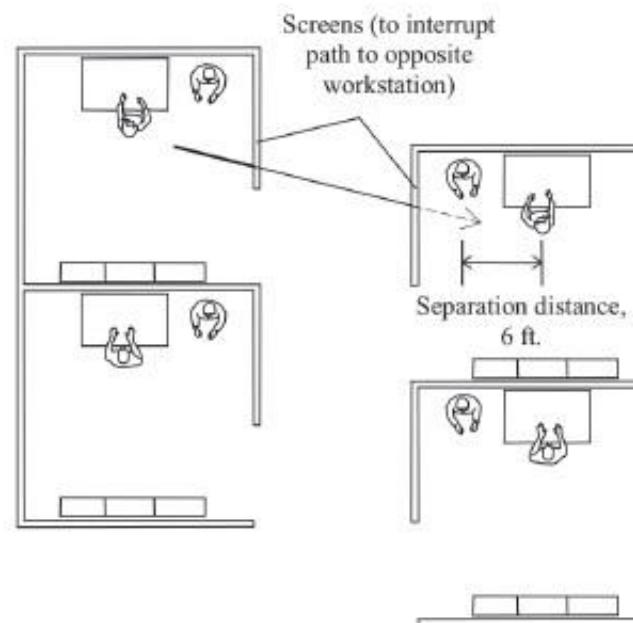
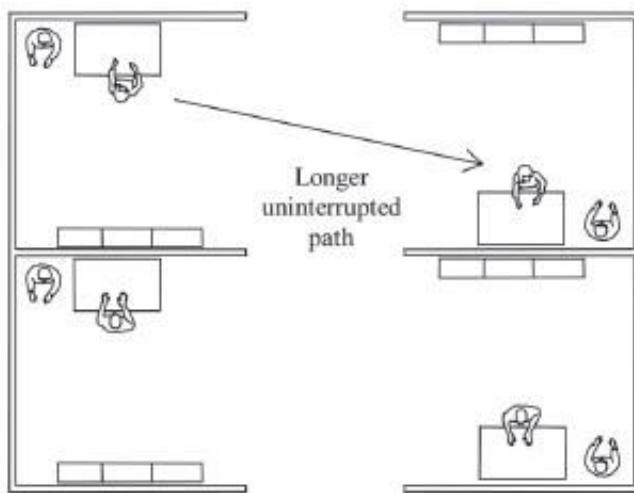
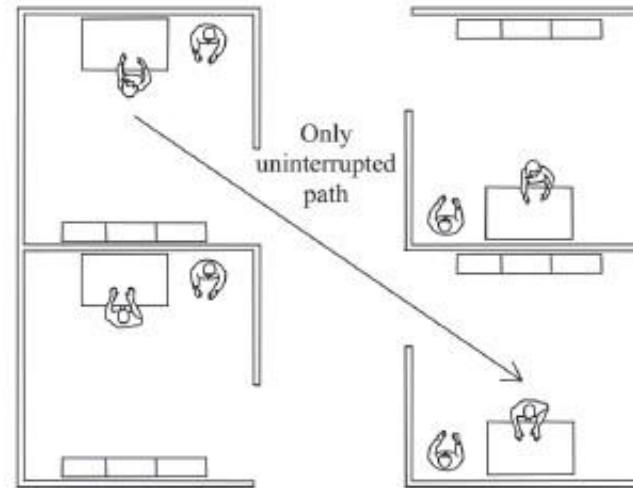
Per quanto riguarda la «schermatura» dei fronti d'onda, di seguito proponiamo alcuni esempi che mostrano quali possano essere le configurazioni di uffici meno idonee ai fini della privacy acustica e come esse possano essere corrette mediante l'introduzione di schermi e una parziale riconfigurazione dello spazio.



### POOR LAYOUTS



### IMPROVED LAYOUTS



Di seguito forniamo invece uno scherma di come possa risultare un ipotetico sistema di Sound Masking in un contesto multiforme, dove sono presenti ambienti a differente destinazione d'uso.



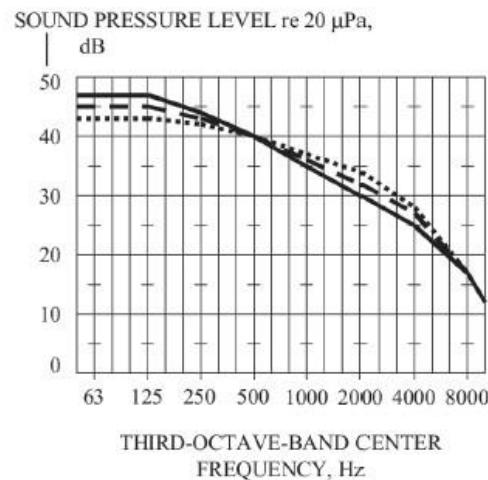
Fonte: «Sound Masking 101» – Cambridge Sound Management

Onde fugare possibili dubbi è bene chiarire che il «rumore» generato da un sistema di Sound Masking non è assolutamente intrusivo in quanto:

1. Si caratterizza per un livello sonoro inferiore al rumore ambientale e comunque sempre molto basso (livello massimo consentito = 45-48 dBA all'orecchio dell'ascoltatore)
2. Lo spettro del rumore è privo di componenti tonali ed impulsive ed è significativamente sbilanciato verso le basse frequenze il che lo rende meno «avvertibile» dall'apparato uditivo
3. Il livello sonoro, nei sistemi di Sound Masking più evoluti, non è fisso ma «insegue» in real-time lo spettro e il livello del rumore ambientale in modo da garantire sempre il rispetto della condizione 1.

Di seguito mostriamo alcuni tipici spettri del rumore generato da un sistema di Sound Masking.

**A Comparison of All Three Masking Spectra**



*FIG. 20 - Comparison of Masking Spectra:*

Sound Masking Spectrum 1 (preferred) —

Sound Masking Spectrum 2 - - - -

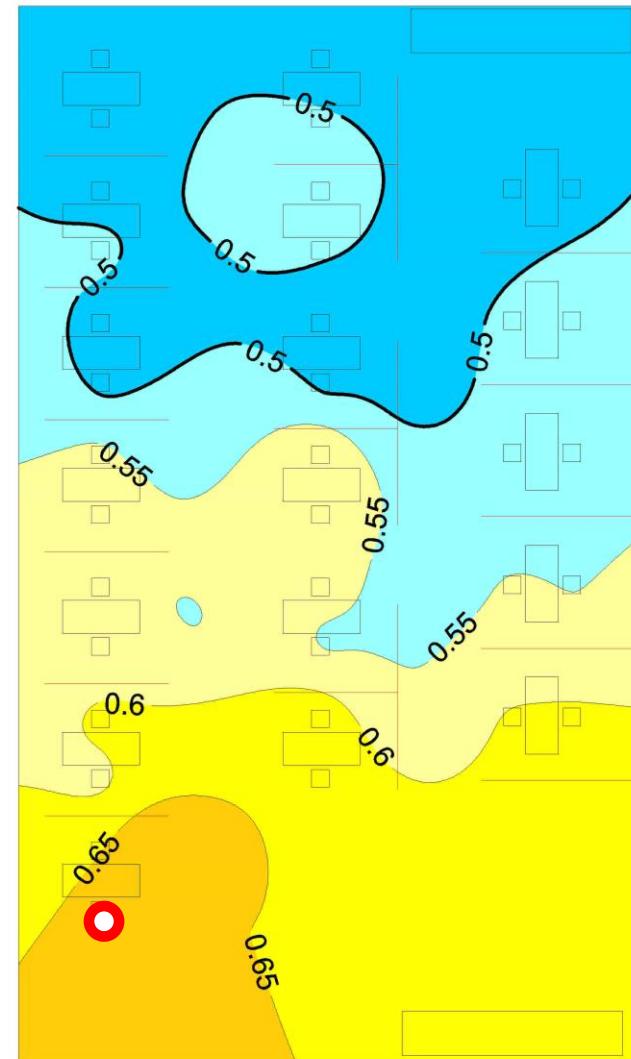
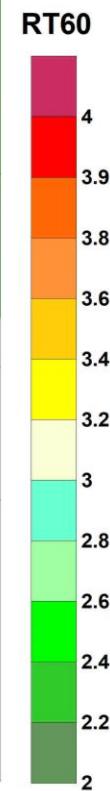
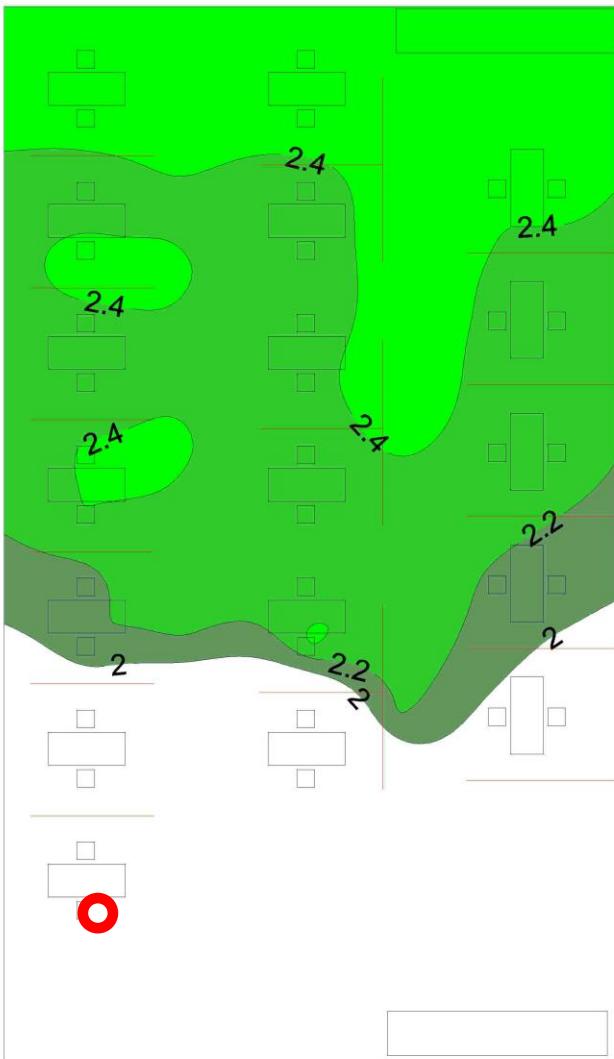
Sound Masking Spectrum 3 .....

Nelle pagine seguenti riportiamo, in forma di mappature acustiche, l'esito di altre due simulazioni condotte sull'ufficio open space già analizzato in precedenza.

Le due mappature si riferiscono alle seguenti situazioni:

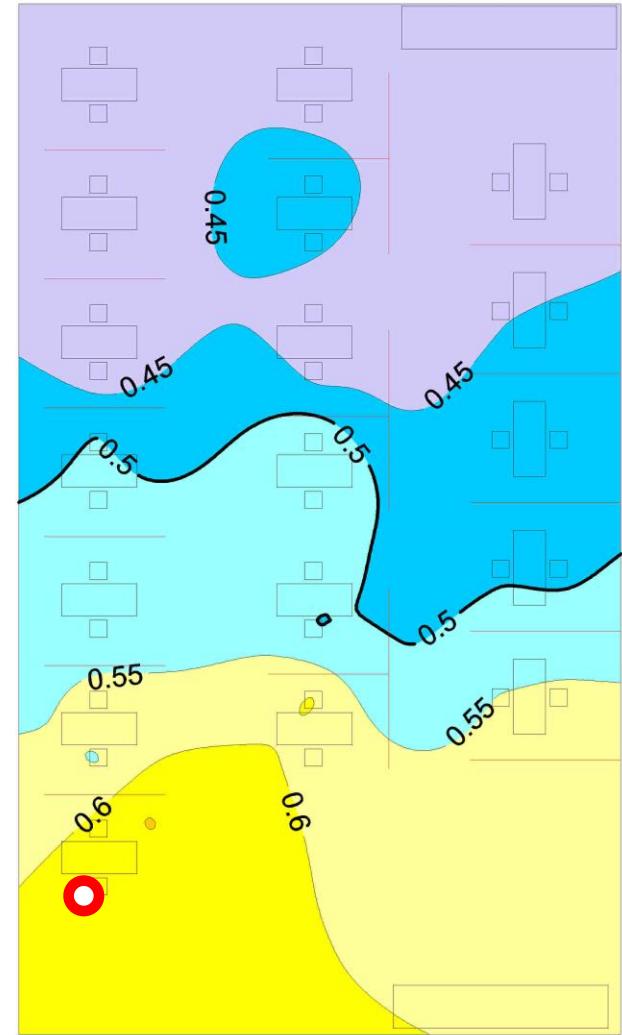
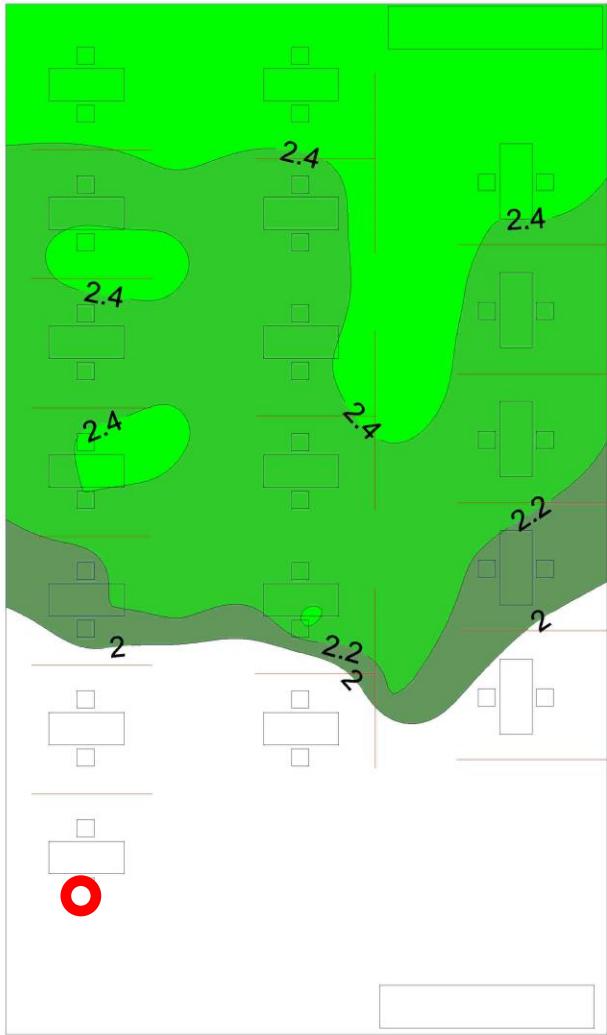
- A. Intervento acustico ambientale completo consistente nel già visto trattamento fonoassorbente a soffitto e nell'introduzione di schermi acustici in vetro
- B. Tutto l'intervento di cui al punto A precedente a cui si aggiunge l'introduzione di un sistema di Sound Masking

Come si vedrà, il sistema di Sound Masking non modifica neanche marginalmente il dato acustico di qualità rappresentato dal contenimento del tempo di riverbero, ma contribuisce a ridurre sensibilmente l'intelligibilità del parlato già a distanze di «solo» 5-6 metri dalla sorgente.



## **Open Office - Superficie in pianta = 336 mq**

## Condizione: ambiente vuoto - trattamento a soffitto + schermi



Open Office - Superficie in pianta = 336 mq

Condizione: ambiente vuoto - trattamento a soffitto + schermi

+ sistema di Sound Masking

Appaiono evidenti i benefici derivanti dall'introduzione del sistema di Sound Masking: il valore di STI si riduce a valori prossimi o inferiori a 0.50 in oltre metà dell'ambiente il che corrisponde ad una notevole diminuzione della distanza di disattenzione  $r_D$ .

Ovviamente un sistema di Sound Masking non è applicabile in tutte le situazioni, ma, considerando la versatilità e la molitudine di configurazioni che possiedono i sistemi più moderni, esso rappresenta una modalità sicura ed affidabile per il raggiungimento di un elevato livello di privacy acustica nella maggior parte dei casi.

Ovviamente tutta la logica che presiede alla individuazione e quantificazione dei singoli interventi di correzione acustica (riduzione del tempo di riverbero, introduzione di schermi e/o riconfigurazione dello spazio, introduzione di un sistema di Sound Masking) richiede l'intervento di un consulente acustico con una comprovata esperienza negli ambiti disciplinari dell'Acustica Architettonica e dell'Elettroacustica.

E' inoltre indispensabile precisare che nessun intervento di correzione della qualità acustica degli uffici può prescindere da una corretta progettazione acustica dell'edificio ed in particolare dal corretto controllo dei requisiti acustici passivi: gli isolamenti di facciata e di partizione dai rumori aerei ed impattivi e la rumorosità degli impianti continui e discontinui. Senza un preciso controllo di queste variabili qualsiasi tentativo di correzione della qualità acustica interna degli spazi è destinato al fallimento.

Va infine sottolineato che una delle migliori e più efficaci azioni correttive è rappresentata dall'adozione di procedure di corretto «comportamento» acustico da parte di tutti coloro che lavorano in questo spazi, come ad esempio: mantenimento di un livello di voce adeguato e mai eccessivo; ricorso a spazi confinati (*quite zones*) e acusticamente isolati in caso di riunioni e/o telefonate importanti o confidenziali, ecc.

Possiamo ora cercare di tratteggiare, sulla base di tutto quanto fin qui argomentato, una sorta di percorso concettuale che occorrerebbe seguire nella progettazione di un ufficio di significative dimensioni. Di seguito la sequenza «cronologica» delle valutazioni che è opportuno eseguire:

1. Analisi della geometria degli ambienti allo scopo di verificare se sussistano condizioni (pareti piane, parallele e riflettenti) che possano dar luogo a fenomeni di «*flutter echo*»
2. Stima preliminare del tempo di riverbero facendo ricorso alle formulazioni classiche (Sabine, Eyring, ecc.)
3. Simulazioni acustiche e analisi dei risultati ed in particolare:
  - \* dei valori di **RT** (confronto con quanto ottenuto con modelli previsionali «*classici*»)
  - \* degli ecogrammi onde verificare se sussistano quei fenomeni negativi di cui al punto 1 (eco e flutter eco)
  - \* dei valori puntuali di **STI** allo scopo di determinare la distanza di disattenzione  $r_D$
4. Individuazione degli interventi eventualmente necessari per la diminuzione della riverberazione
5. Individuazione degli interventi eventualmente necessari per l'incremento della privacy acustica

Al termine di questa lezione si potrebbe pensare di aver adeguatamente trattato il tema della qualità acustica degli uffici e di essere, almeno in linea teorica, sufficientemente in grado di dare risposta a tutte le problematiche che possono presentarsi.

Sulla scorta di 32 anni di attività nel campo dell'Acustica, posso affermare che non è così in quanto esistono 3 argomenti che sono sempre presenti e che rappresentano la vera sfida per il consulente acustico: questi 3 argomenti possono essere sintetizzati con 3 semplici domande che il consulente si sente e si sentirà sempre porre dal committente, dal progettista, dall'impresa e da tutti coloro che giocano un ruolo decisionale cruciale:

**Com'è? Com'è fatto?**

**Dove andrebbe messo/installato?**

**Quanto costa?**

Nulla che chiami in causa riverbero, chiarezza, privacy, intelligibilità; semplicemente domande pratiche, concrete, volendo anche un po' prosaiche, ma comunque ineludibili.

Un consulente acustico deve saperle fronteggiare e disinnescare; vediamo sinteticamente come.

## 1) Com'è? Com'è fatto?

Quando ho iniziato ad occuparmi di Acustica (anni '80) sostanzialmente esistevano due solo tipologie di materiali «acustici»: lane minerali (vetro o roccia) e schiume melamminiche; successivamente è comparsa la fibra poliestere.

Oggi fortunatamente i dispositivi (fonoassorbenti e diffondenti) per il controllo e/o trattamento della risposta acustica degli ambienti sono innumerevoli, possono essere realizzati con una vasta categoria di materiali (legno, metallo, vetro, intonaco, ecc.) e, last but not least, il loro aspetto geometrico e cromatico non conosce sostanzialmente vincoli.

Un'ulteriore annotazione va riservata ai cosiddetti «**metamateriali**» acustici, dispositivi che consentono un controllo elevatissimo del potere fonoassorbente e/o fonoisolante nonostante dimensioni (spessori) minime, inconciliabili con la teoria acustica *classica*.

In sintesi oggi non dovrebbero sussistere obiezioni di sorta relativamente all'aspetto dei dispositivi dedicati al trattamento acustico degli ambienti.

## 2) Dove va posizionato?

Non esiste ovviamente una risposta univoca in quanto la collocazione di un trattamento acustico va individuata sulla base della disponibilità di spazio libero e a seguito di una verifica incrociata con tutti gli altri vincoli e/o esigenze: sicurezza, operatività, funzionalità, ecc.

Ciò che però deve essere chiaro è che non esistono soluzioni magiche e che qualsiasi trattamento acustico per funzionare necessita di essere introdotto in quantità non trascurabili: in un ufficio di 300 mq in pianta con 30 mq di fonoassorbente non ci si fa nulla.

Di conseguenze obiezioni quali «*non c'è posto*» o «*abbiamo disponibili solo due porzioni esigue di parete*» non portano da nessuna parte: se l'inadeguatezza acustica di uno spazio è percepita come un problema serio da risolvere, è necessario dedicarvi lo spazio e le risorse necessarie.

In ogni caso, la quantità e la disposizione del trattamento acustico devono essere determinate da un consulente con un'adeguata preparazione ed esperienza nel campo dell'Acustica Architettonica.

### 3) Quanto costa?

Anche in questo caso la risposta unica non esiste. Il costo unitario (al mq) di un trattamento acustico dipende infatti da una serie di fattori *esterni* all'ambito acustico, ossia:

- a) Classe di reazione al fuoco
- b) Tipologia di materiale, di forma, di finitura e colore
- c) Modalità di installazione e montaggio
- d) Necessità di customizzazioni specifiche

Questa domanda va quindi rinviata al mittente in questi termini: **Qual è il vostro budget a disposizione?**

Sulla base della risposta che gli verrà fornita, il consulente acustico potrà così o individuare quali siano i dispositivi, i trattamenti, i materiali più idonei al caso di specie o, nel caso di budget insufficiente, sancire l'impossibilità a risolvere la problematica.

In conclusione, per dare una risposta definitiva alle 3 domande «cruciali» che abbiamo appena analizzato, vale la pena ricordare un famoso detto popolare che riporto testualmente

**We sell three things, Good, Fast and Cheap,  
but you can only pick two of them, but remember:**

**Good and Cheap won't be Fast**

**Cheap and Fast won't be Good**

**Fast and Good won't be Cheap**

**GRAZIE DELL'ATTENZIONE**