



Acustica per ambienti scolastici

Requisiti prestazionali, soluzioni di progetto,
verifiche a calcolo e in opera

A cura di
Prof.ssa Arianna Astolfi
Dott.ssa Giuseppina Emma Puglisi
Dott. Angelo Lombardo

Sounds Beautiful

Sommario

1. INTRODUZIONE	4
1.1 Gli effetti del rumore sull'apprendimento	4
1.2 Lo sforzo vocale come malattia professionale	6
2. LA LEGISLAZIONE E LA NORMATIVA TECNICA	12
2.1 Leggi nazionali	12
2.1.1 Il D.P.C.M. del 5/12/1997, Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici	12
2.1.2 Legge 221 del 28/12/2015 in tema di green economy.	12
2.1.3 DM 11/10/2017 sui "Criteri ambientali minimi" (CAM)	13
2.2 Norme tecniche	14
2.2.1 UNI 11367 "Acustica in edilizia – Classificazione acustica delle unità immobiliari – Procedura di valutazione e verifica in opera"	14
2.2.2 UNI 11532 "Acustica in edilizia – Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati – Metodi di progettazione e tecniche di valutazione"	14
3. I REQUISITI ACUSTICI	16
3.1 Il tempo di riverberazione	16
3.2 Il livello del rumore di fondo	21
3.3 L'isolamento acustico di facciata	29
3.4 L'isolamento ai rumori aerei fra ambienti adiacenti	35
3.5 Il livello del rumore di calpestio	46
3.6 Gli indici di intelligibilità.	54
3.6.1 Speech Interference Level (SIL)	54
3.6.2 Chiarezza C50	55
3.6.3 Speech Transmission Index (STI)	57
4. LE SOLUZIONI DI PROGETTO PER IL CONTROLLO DEL RUMORE	64
4.1 Il contesto ambientale: il controllo del rumore all'esterno dell'edificio	64
4.2 L'ambiente interno: la dislocazione degli spazi per il controllo del rumore	71
4.3 L'isolamento dell'edificio scolastico dal rumore esterno ed interno	73
4.3.1 L'isolamento acustico di facciata	74
4.3.2 L'isolamento acustico delle partizioni interne	86
4.3.3 L'isolamento acustico dal rumore da calpestio	99
4.3.4 La correzione dei ponti acustici	104
4.4 Il controllo del rumore degli impianti	106
5. LE SOLUZIONI DI PROGETTO PER IL CONTROLLO DEL RUMORE	111
5.1 I materiali e le soluzioni per l'assorbimento acustico	111
5.2 Le aule per la didattica	124
5.3 Intervento di correzione acustica in un'aula di scuola materna	126
5.3.1 Descrizione dell'aula prima del trattamento acustico	126
5.3.2 Misure acustiche	129
5.3.3 Risultati delle misurazioni ante operam	130
5.3.4 Il progetto acustico	131
5.3.5 Risultati delle misurazioni post operam	135

1. Introduzione

Caratteristica delle aule e degli altri ambienti scolastici come le palestre, le piscine, le aule di musica, etc. è la loro specifica vocazione alla comunicazione, che è la base dei processi di apprendimento. Elevati livelli di rumore e eccessiva riverberazione ne compromettono la funzionalità.

In Italia, la maggior parte degli ambienti per la didattica non soddisfa i requisiti acustici minimi per renderli idonei alla loro funzione. Studenti ed insegnanti sono gli utenti della scuola che risentono delle conseguenze causate da un'acustica non adeguata. Livelli di rumore di fondo considerati tollerabili per gli adulti, ovvero soggetti nel pieno delle proprie capacità uditive e di comprensione, determinano condizioni d'ascolto sfavorevoli per i bambini, che necessitano di requisiti più restrittivi per la comprensione della parola. L'acustica non adeguata è una ulteriore barriera all'educazione per le minoranze, come i bambini non di madre lingua, con speciali esigenze pedagogiche o deficit uditivi. Rispetto ad altri lavoratori, gli insegnanti presentano con maggior frequenza sintomi legati a patologie vocali e lamentano sensazioni di malessere ad essi correlate.

Negli ultimi decenni la ricerca internazionale in campo acustico ha rivolto in modo sempre crescente l'attenzione verso la qualità dell'ascolto nelle aule e negli altri ambienti scolastici, in particolare ai livelli primari del percorso formativo, in quanto è tale fase che si presuppone possa presentare conseguenze più importanti sull'educazione degli individui e quindi sulla società.

Questo manuale nasce con l'intento di stimolare l'attenzione verso il problema dell'acustica degli ambienti scolastici, che all'estero sta assumendo sempre più importanza, come si evince dalla pubblicazione di recenti standard in materia che sono recepiti all'interno delle nuove leggi italiane. Si rivolge ai progettisti di scuole di ogni ordine e grado, ponendosi come guida aggiornata sia nel caso di nuova costruzione che di ristrutturazione di edifici esistenti. In questo secondo caso, in particolare, è necessario operare delle scelte di intervento prioritarie, strettamente necessarie per soddisfare i requisiti acustici minimi, relazionandosi con il contesto ambientale esterno e con la tecnologia dell'edificio esistente.

Nel presente manuale si riportano i requisiti acustici previsti dai documenti normativi nazionali, si forniscono gli strumenti per effettuare le verifiche acustiche, con esempi applicativi, e si elencano numerose soluzioni per l'isolamento e l'assorbimento acustico. Nel capitolo 5 è descritto un intervento di correzione acustica in un'aula di una scuola dell'infanzia, in accordo con la recente norma tecnica UNI 11532.

1.1 GLI EFFETTI DEL RUMORE SULL'APPRENDIMENTO

Da molti decenni la ricerca internazionale si occupa degli effetti del rumore sull'apprendimento e le prestazioni scolastiche dei bambini [1-3].

In particolare, si tratta di studi riferiti a bambini tra i 5 e gli 11 anni che frequentano le classi della scuola primaria. Dalle ricerche effettuate, un'esposizione cronica al rumore comporta carenze nell'attenzione prolungata e nell'attenzione visiva, scarsa discriminazione uditive e percezione della parola, scarsa memoria per compiti che richiedono elaborazione di materiale semantico e limitata abilità nella lettura. Inoltre, l'eccesso di rumore può provocare disturbo e affaticamento, determinando una riduzione delle prestazioni scolastiche nei bambini, ma anche interruzione della continuità didattica per gli insegnanti, causata da malattie dell'apparato fonatorio e dallo stress.

Il rumore a cui sono sottoposti i bambini nelle aule scolastiche è sia rumore trasmesso dall'esterno attraverso l'involucro dell'edificio, sia rumore prodotto internamente all'edificio stesso. I bambini nelle scuole sono quindi soggetti a rumore che proviene da un'ampia fonte di sorgenti con conseguenze ed effetti di tipo diverso.

In Figura 1. 1 sono rappresentati i tipici rumori che possono interessare l'edificio scolastico.

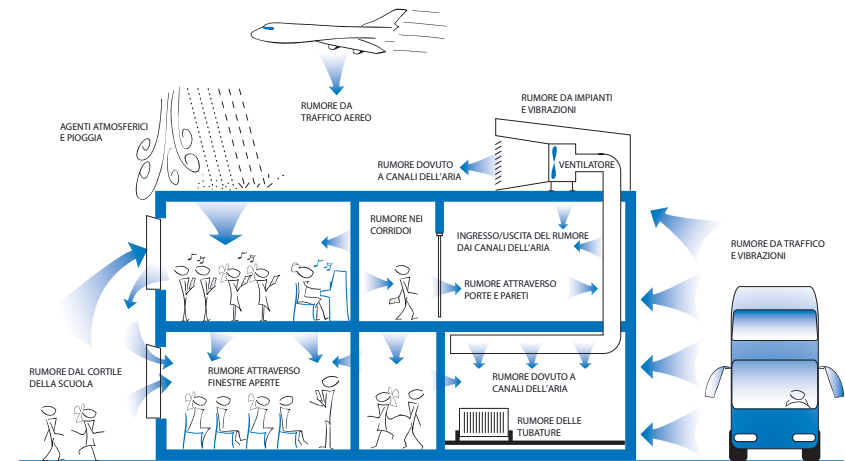


Figura 1. 1 - Tipiche sorgenti di rumore all'interno e all'esterno dell'edificio scolastico (tratto da [4]).

Il rumore da traffico aereo risulta particolarmente dannoso per i bambini esposti per periodi prolungati a questo tipo di rumore [5]. Dai risultati del progetto Europeo RANCH, Aircraft and Road Traffic Noise and Children's Cognition and Health [6], emerge come l'esposizione cronica al rumore da traffico aereo abbia degli effetti negativi sulla comprensione nella lettura associata all'incremento del grado di disturbo percepito dai bambini.

Altri studi hanno dimostrato che anche il rumore causato dal traffico ferroviario influenza l'abilità nella lettura. Bronzaft e McCarthy [7] hanno evidenziato come i bambini situati sul lato più silenzioso di una scuola posta accanto a una ferrovia sopraelevata avessero risultati migliori nella lettura rispetto ai bambini situati sul lato esposto al rumore del treno, con livelli di rumore superiori a 89 dB(A).

Tuttavia, il numero di scuole in prossimità di aeroporti o ferrovie risulta estremamente basso rispetto alla densità di scuole nelle aree urbane dove il rumore da traffico veicolare all'esterno dell'edificio è predominante. A seguito di un'indagine effettuata nell'area urbana londinese su un campione di 140 scuole elementari, Shield e Dockrell [8,9] hanno rilevato un valore medio di livello di pressione sonora di 57 dB(A), all'esterno, in prossimità dell'edificio scolastico, e di 47 dB(A) all'interno di aule non occupate. Il valore medio del livello massimo di pressione sonora, $L_{A,max}$, è risultato 89,8 dB(A).

Le due ricercatrici inglesi hanno dimostrato [10] come per i bambini di grado elementare l'esposizione al rumore intermittente da traffico unito al rumore da chiacchierio determina punteggi minori nei compiti che richiedono velocità di elaborazione, rispetto al solo chiacchierio o all'assenza di rumore. Solo il rumore da chiacchierio, e non quello da traffico più chiacchierio, influenza negativamente i punteggi sui compiti verbali. I bambini più grandi, attorno agli 11 anni, sono maggiormente sensibili rispetto ai bambini più piccoli, di 7 anni, anche per la prolungata esposizione al rumore nel corso del tempo, ed in particolare sono disturbati dalla presenza di singoli eventi sonori esterni, come i passaggi di motociclette o camion [10-11].

All'interno delle aule scolastiche di scuola primaria la principale fonte di rumore risulta essere il rumore generato dagli scolari stessi mentre svolgono la normale attività didattica. La presenza di studenti in classi di scuola primaria incrementa il rumore di fondo ad un livello medio di 56 dB(A) se stanno svolgendo un'attività didattica silenziosa e fino a 77 dB(A) se svolgono attività di gruppo. Il livello medio del rumore di fondo per l'attività didattica più frequente, che prevede i bambini seduti al proprio banco con qualche interazione fra loro, è pari a 65 dB(A) [1].

Oltre a condizionare l'apprendimento dei bambini normoudenti, le cattive condizioni acustiche pregiudicano maggiormente i bambini con problemi di udito, i bambini non madre lingua e quelli con disturbi di attenzione e di linguaggio [1,12]. A tale proposito è stato stimato che in ogni momento fino al 40% dei bambini nelle scuole primarie soffre di qualche forma di danneggiamento all'udito, sia temporaneo, dovuto a un raffreddore o ad una infezione all'orecchio, che permanente. Per questi bambini è necessario garantire elevati valori del rapporto segnale-rumore (cioè la differenza fra il livello della voce dell'insegnante e quello del rumore), in quanto bambini e adulti con ridotte capacità uditive sono maggiormente sensibili al rumore e alla riverberazione rispetto a quelli con normali capacità. In alcuni casi, una soluzione per migliorare le condizioni acustiche nelle aule per bambini con ridotte capacità uditive consiste nell'installazione di sistemi di amplificazione del suono, dai quali risultano avvantaggiati sia i bambini non udenti che quelli normoudenti. Tuttavia, questi sistemi operano nelle migliori condizioni solo se le caratteristiche acustiche delle aule sono buone e non possono considerarsi un'alternativa al progetto acustico dell'aula scolastica [13].

1.2 LO SFORZO VOCALE COME MALATTIA PROFESSIONALE

Oltre ad essere dannosa per i bambini, l'acustica non adeguata in un'aula scolastica determina condizioni sfavorevoli per l'insegnamento. Il rumore e la riverberazione inducono un elevato sforzo vocale per gli insegnanti, i cui effetti si manifestano come sintomi di una vera e propria malattia professionale, con conseguente assenteismo e interruzione della continuità didattica [14-17].

Diversi studi si sono occupati di analizzare le patologie vocali insorte negli insegnanti. Un'analisi del "Voice Care Network", condotta nel Regno Unito su pazienti con problemi di voce clinici, ha reso noto che il 12% è rappresentato da insegnanti, anche se questi ultimi sono l'1,5% della popolazione [18]. Studi condotti negli Stati Uniti [19] indicano che gli insegnanti rappresentano la categoria professionale più affetta da disfunzioni vocali; in particolare il 20% degli insegnanti è sottoposto ad uno sforzo vocale patologico. Lejska [14] ha rilevato, attraverso un completo esame foniatico su 772 insegnanti, la presenza di patologie vocali per il 7,1% del campione, salita al 23,5% considerando anche i casi di fonostenia in assenza di una vera e propria patologia. Fihlo et al. [20] riportano che il 9,7% di insegnanti presentano noduli alle corde vocali mentre Urritikoetxea et al. [21] affermano che tale patologia è presente nel 13% dei casi.

La norma UNI EN ISO 9921 [22] definisce lo sforzo vocale come il livello equivalente continuo di pressione sonora ponderata A misurato ad un metro di distanza di fronte alla bocca del parlatore, $L_{S,A,1m}$, e individua 5 gradi di sforzo vocale da "rilassato" a "molto forte", come riportato in Tabella 1. 1.

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

Tabella 1. 1 – Gradi di sforzo vocale secondo la norma UNI EN ISO 9921.

Le misurazioni di sforzo vocale degli insegnanti evidenziano come il livello sia, in molti casi, maggiore rispetto a quello che la norma UNI EN ISO 9921 [22] definisce come sforzo vocale "normale", ovvero 60 dB(A). Riferito al campo libero (condizioni anecoiche), Houtgast [23] ha misurato uno sforzo vocale di 57,0 dB(A) in aule occupate in presenza di rumore da traffico, Picard e Bradley [24] riportano 60,5 dB(A) come valore medio dalla scuola materna fino all'università, Sato e Bradley [25] hanno misurato 68,8 dB(A) in scuole elementari rumorose, mentre Astolfi e Pellerey [26] un valore medio di 62,0 dB(A) in scuole secondarie.



Harris Academy, Sutton, UK -
Rockfon Ekla, Rockfon Blanka

Il livello equivalente continuo di pressione sonora ponderata A

Il livello equivalente continuo di pressione sonora ponderata A, $L_{Aeq,T}$, è il valore del livello di pressione sonora ponderata secondo la curva "A" di un suono costante che, nel corso di un periodo specificato T, ha la medesima pressione quadratica media del suono considerato, il cui livello varia in funzione del tempo. La formula per il calcolo è la seguente:

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

dove $p_A(t)$ è il valore istantaneo della pressione sonora ponderata "A" del segnale acustico in Pascal (Pa), $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ è la pressione sonora di riferimento, pari $2 \cdot 10^{-5}$ Pa, T il tempo che si considera per la valutazione del livello sonoro continuo equivalente.

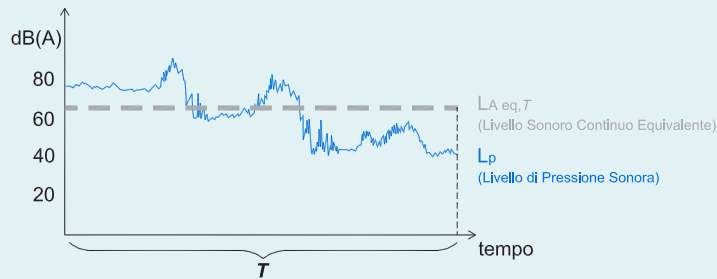


Figura tratta da [27].

La curva di ponderazione "A" comprende le correzioni apportate al livello di pressione lineare per tener conto della sensibilità dell'orecchio umano in funzione della frequenza nei confronti del disturbo arrecato dal rumore (vedi paragrafo 3.2).

La norma UNI EN ISO 9921 riporta l'influenza del rumore sullo sforzo vocale (Figura 1. 2), noto come 'effetto Lombard', per il quale un parlatore in ambiente rumoroso tenderà a parlare più forte per sovrastare il rumore di fondo. Facendo ricorso alla tecnica della videolaringostroboscopia, Astolfi *et al.* [28] hanno osservato che su un campione di 29 insegnanti sottoposti a monitoraggio dello sforzo vocale tramite un dispositivo non invasivo durante l'attività lavorativa, il 45% di loro presentava una patologia a carico del distretto laringeo. Tale riscontro è associato statisticamente alla condizione non sempre ottimale dell'acustica delle aule scolastiche in cui insegnano, sia in termini di eccessivo rumore sia di riverberazione, poiché determina un aumento inconscio dell'intensità della voce emessa al fine di migliorare la loro udibilità. Kob *et al.* [15] segnalano gli effetti negativi dell'eccesso di riverberazione sulla voce degli insegnanti in aule di scuola secondaria, evidenziando un miglioramento delle prestazioni vocali in seguito a trattamenti acustici fonoassorbenti.

Una serie di studi recenti ha evidenziato la relazione tra il livello di voce prodotto dagli insegnanti durante l'attività lavorativa e il tempo di riverberazione delle aule scolastiche sia di grado primario [29,30] sia di grado secondario [31]. In particolare, questi lavori, svolti su diversi campioni di insegnanti e in tempi diversi, mostrano tutti come tempi di riverberazione molto lunghi e molto corti portino ad un incremento dello sforzo vocale. Valori di riverberazione compresi tra 0,7 s e 0,8 s rappresentano invece la condizione acustica ottimale per minimizzare l'intensità della voce dell'insegnante.

Il controllo del rumore e della riverberazione sembrano dunque essere essenziali per ridurre le patologie vocali riscontrate in letteratura; anche se la ricerca è ancora in corso, studi soggettivi condotti in aule scolastiche prima e dopo l'ottimizzazione acustica indicano un miglioramento significativo delle condizioni di benessere acustico percepito sia dagli studenti che dagli insegnanti [15,32-33].

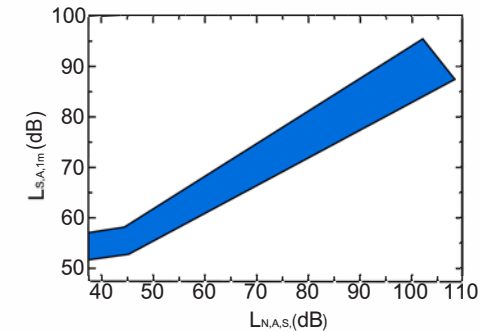


Figura 1. 2 - Rappresentazione dell'effetto "Lombard", come relazione tra lo sforzo vocale, $L_{S,A,1m}$ e il livello di rumore di fondo nella posizione del parlatore, $L_{N,A,S}$.

Riferimenti bibliografici

1. Shield B. M. e Dockrell, J. E., "The effects of Noise on Children at School: A Review", *Building Acoustics* 10(2), pp.97-116, 2003.
2. Ronse L. M. e Wang, L. M., "Relationships between unoccupied classroom acoustical conditions and elementary student achievement measured in eastern Nebraska," *J. Acoust. Soc. Am.* 133(3), pp. 1480-1495, 2013.
3. Puglisi G. E., Prat A., Sacco T. e Astolfi A., "Influence of classroom acoustics on the reading speed: A case study on Italian second-graders," *J. Acoust. Soc. Am.* 144(2), pp. EL144-E149, 2018.
4. Department for Education, *Acoustic Design of School: a design guide*. London, 2015 (<http://ioa.org.uk>).
5. Hygge S., Evans G.W. e Bullinger, M., "The Munich Airport noise study: Cognitive effects on children from before to after the change over of airports". *Proceedings of Internoise '96*, pp.2189 – 2192, 1996.
6. Stansfeld S. A., Berglund B., Clark C., Lopez-Barrio I., Fischer P., Öhrström E., Haines M.M., Head J., Hygge S., van Kamp I. e Berry B. F., "Aircraft and road traffic noise and children's cognition and health: a cross-national study", *Lancet* 365, pp.1942-49, 2005.
7. Bronzaft A.L. e McCarthy D.P., "The effect of elevated train noise on reading ability", *Environment and Behaviour*, 7(4), pp. 517-527, 1975.
8. Shield, B., Dockrell, J., Asker R. e Tachmatzidis, I., "The effects of noise on the attainments and cognitive development of primary school children", *Final report for Department of Health and DETR*, 2002.
9. Shield B. M. e Dockrell J. E., "The effects of environmental and classroom noise on the academic attainments of primary school children", *J. Acoust. Soc. Am.* 123(1), pp.133-144, 2008.
10. Dockrell J. E. e Shield B. M., "Acoustical barriers in classrooms: the impact of noise on performance in the classroom", *British Educational Research Journal* 32(3), pp.509-525, 2006.
11. Shield B. M. e Dockrell J. E., "The effect of noise on children at school: a review", *J. Building Acoustics*, 10(2), pp.97-106, 2003.
12. Bovo R., Ciorba A., Busi M. e Martini A., "Effetti del rumore sulla intelligibilità verbale nei bambini bilingue", *Atti del 35° Convegno dell'Associazione Italiana di Acustica*, Milano, 11-13 giugno 2008.
13. Shield B., "La necessità di una buona acustica nelle aule scolastiche", *Seminario AIA-GAA "Acustica e ambienti scolastici"*, Venezia, 5 maggio 2004.
14. Leijaska V., "Occupational voice disorders in teachers" *Pracovini Lekarstvi* 19, pp.119-121, 1967.
15. Kob M., Behlery G., Kamprolfz A., Goldschmidt O. e Neuschaefer-Rube C., "Experimental investigations of the influence of room acoustics on the teacher's voice", *Acoust. Sci. & Tech.* 29(1), pp. 86-94, 2008.
16. Abenante L. e Bovo R., "La cattiva acustica delle aule scolastiche: effetti sullo sforzo vocale dell'insegnante", *Giornata Studio "Acustica e ambienti scolastici. La fatica di imparare e di insegnare nella scuola che cambia"*, Roma, 2008.
17. Valdis Ingibjörg Jonsdottir, "Teachers' vocal symptoms related to their opinion regarding room acoustics", *EURONOISE 2006*, Tampere, Finland.
18. Commins D., "Survey of UK voice clinics 2001/2 (2002)." *Voice Care Network UK*, 2002.
19. Titze I., Lemke J. e Montequin D., "Populations in the U.S. Workforce Who Rely on Voice as a Primary Tool of Trade: A Preliminary Report." *The Journal of Voice* 11(3), pp.254-259, 1997.
20. Fihlo M., Gomez F.G. e Macedo C., "Videolaryngostroboscopy for pre-admissional examination of school teachers", *First World Congress of Voice*, Oporto, Portugal, 1995.
21. Urrutikoetxea A., Ispizua A., Mantellanes F. e Aurrekoetxea J., "Prevalence of vocal nodules in teachers", *First World Congress of Voice*, Oporto, Portugal, 1995.
22. Norma Italiana UNI EN ISO 9921:2004. *Ergonomia - Valutazione della comunicazione verbale*.
23. Houtgast T., "The effect of ambient noise on speech intelligibility in classrooms," *Appl. Acoust.* 14, pp.15-25, 1981.
24. Picard M. e Bradley J. S., "Revisiting speech interference in classrooms," *Audiology* 40, pp. 221-244, 2001.
25. Sato H. e Bradley J. S., "Evaluation of acoustical conditions for speech communication in active elementary school classrooms", *J. Acoust. Soc. Am.* 123, pp. 2064-2077, 2008.
26. Astolfi A. e Pellerey F., "Subjective and objective assessment of acoustical and overall environmental quality in secondary school classrooms", *J. Acoust. Soc. Am.* 123 (1), pp.163-173, 2008.
27. Schede Tecniche per il corso "Progettazione fisico-tecnica dell'ambiente interno", a cura di G. Piccablotto, Politecnico di Torino, 2006.
28. Astolfi A., Bottalico P., Accornero A., Garzaro M., Nadalin J. E Giordano C., "Relationship between vocal doses and voice disorders on primary school teachers," *9th European Conference on Noise Control, EURONOISE 2012*; Prague; Czech Republic; 10 June.
29. Bottalico P. e Astolfi A., "Investigations into vocal doses and parameters pertaining to primary school teachers in classrooms," *J. Acoust. Soc. Am.* 134(4), pp. 2817-2827, 2012.
30. Puglisi G. E., "Four-day-follow-up study on the voice monitoring of primary school teachers: Relationships with conversational task and classroom acoustics," *J. Acoust. Soc. Am.* 141(1), pp. 441-452, 2017.
31. Calosso G., "A one-school year longitudinal study of secondary school teachers' voice parameters and the influence of classroom acoustics" *J. Acoust. Soc. Am.* 141(2), pp. 1055-1066, 2017.
32. Astolfi A., "Acoustical quality for students and teachers in secondary-school classrooms in Italy", *IOA Meeting "Speech and hearing in learning environmental"* 29th January 2008, London. *Proceeding of the Institute of Acoustics*, Vol. 30. Pt.1 2008.
33. Astolfi A., Carullo A., Puglisi G. E. e Pavese L., "Effetti della correzione acustica in aule di scuola elementare sui parametri vocali delle insegnanti," *41° Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Acustica*, Pisa, 17-19 giugno 2014.

2. La legislazione e la normativa tecnica

Le recenti ricerche nel campo dell'acustica degli ambienti scolastici hanno dato luogo alla redazione e/o alla revisione di una serie di raccomandazioni, linee guida, norme tecniche, direttive e leggi che ne recepiscono i risultati. In questo capitolo sono richiamati e dettagliati i principali riferimenti vigenti a livello nazionale, al fine di rendere il presente manuale un valido supporto alla progettazione acustica degli ambienti scolastici per professionisti ed esperti del settore.

2.1 LEGGI NAZIONALI

A livello nazionale, i principali riferimenti legislativi per la progettazione e realizzazione di edilizia scolastica pubblica sono:

- Il D.P.C.M. del 5/12/1997 - "Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici";
- La legge n. 221 del 28/12/2015 - "Collegato ambientale", promozione di misure di green economy;
- Il D.M. dell'11/10/2017 pubblicato sulla G.U. del 6/11/2017 - "Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici".

2.1.1 Il D.P.C.M. del 5/12/1997, Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici

Il D.P.C.M. 5/12/1997 attua la Legge quadro n. 447 del 26/10/1995 [1] sull'inquinamento acustico definendo i requisiti acustici passivi, in termini di limiti e valori di riferimento, degli edifici in funzione della tipologia di ambiente abitativo. Il D.P.C.M. si applica nel caso di edilizia scolastica privata poiché per l'edilizia pubblica si rimanda alla recente DM dell'11/10/2017 sui Criteri Ambientali Minimi (CAM) [2]. Nel caso dell'isolamento acustico di facciata il valore minimo di riferimento previsto dal D.P.C.M. 5/12/1997 è superiore al valore minimo di riferimento previsto dai CAM, per questo è prassi riferirsi al valore limite del D.P.C.M. 5/12/1997.

Rispetto all'isolamento acustico tra ambienti adiacenti, il D.P.C.M. riferisce tale prestazione a elementi di separazione tra due distinte unità immobiliari. Il decreto non è applicabile nel caso di due aule adiacenti in quanto non costituiscono due distinte unità immobiliari ai sensi dell'art. 2 del D.M. 2 gennaio 1998 n° 28 sul catasto dei fabbricati [3]. Nel caso di partizioni fra aula e corridoio (ambiente di circolazione) il decreto non riporta alcuna indicazione.

Il D.P.C.M. riporta i valori di riferimento per il tempo di riverberazione rimandando alla obsoleta Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici N. 3150 del 22/05/1967 [4], recante i criteri di valutazione e collaudo dei requisiti acustici negli edifici scolastici.

2.1.2 Legge 221 del 28/12/2015 in tema di green economy

La Legge 28/12/2015, n. 221, recante "Disposizioni in materia ambientale per promuovere misure di green economy e per il contenimento dell'uso eccessivo di risorse naturali" (c.d. "collegato ambientale" alla Legge di stabilità 2016), in vigore dal 2 febbraio 2016, prevede significative modifiche al vigente codice dei contratti pubblici volte ad agevolare il ricorso agli appalti verdi e l'applicazione di Criteri Ambientali Minimi (CAM). La legge prevede che il Green Public Procurement (GPP, o "Acquisti Verdi nella pubblica amministrazione"), cioè lo strumento che intende favorire lo sviluppo di un mercato di prodotti e servizi a ridotto impatto ambientale, diventi obbligatorio. Nello specifico, la principale

novità in fatto di GPP è l'obbligo di applicazione dei Criteri Ambientali Minimi (CAM) per il 100% nelle categorie connesse al raggiungimento dell'efficienza energetica e conseguenti emissioni di CO2 e per almeno il 50% di tutte le categorie d'appalto e servizi per i quali i criteri ambientali minimi sono stati approvati o verranno in futuro approvati o aggiornati. La Legge 221/2015 interviene sugli elementi di valutazione dell'offerta tecnica nel quadro del criterio dell'offerta economicamente più vantaggiosa, mediante l'implementazione del "Life Cycle Costing" e di nuovi criteri "verdi" valorizzabili in sede di attribuzione dei punteggi. Infatti, l'inclusione delle caratteristiche ambientali consentirà, a seconda dei criteri ambientali individuati, una riduzione dei costi connessi all'utilizzo quali il consumo di energia e altre risorse, dei costi relativi al fine vita, come i costi di raccolta e di riciclo, e/o una riduzione di altri costi imputati ad altre esternalità ambientali del bene o servizio considerato.

Nel merito dell'edilizia scolastica, all'articolo 23 della legge (capo V) si indica che: "Le amministrazioni pubbliche, nelle more dell'adozione da parte delle regioni di specifiche norme tecniche per la progettazione esecutiva degli interventi negli edifici scolastici, al fine di consentirne la piena fruibilità dal punto di vista acustico, prevedono, nelle gare d'appalto per l'incremento dell'efficienza energetica delle scuole e comunque per la loro ristrutturazione o costruzione, l'impiego di materiali e soluzioni progettuali idonei al raggiungimento dei valori indicati per i descrittori acustici dalla norma UNI 11367:2010 e dalla norma UNI 11532:2014 [...]". Tali specifiche sono state successivamente recepite dal DM 11/10/2017 sui CAM.

2.1.3 DM 11/10/2017 sui "Criteri ambientali minimi" (CAM)

I Criteri Ambientali Minimi (CAM) sono "i requisiti ambientali ed ecologici definiti dal Ministero dell'Ambiente volti ad indirizzare le Pubbliche Amministrazioni verso una razionalizzazione dei consumi e degli acquisti fornendo indicazioni per l'individuazione di soluzioni progettuali, prodotti o servizi migliori sotto il profilo ambientale".

L'applicazione dei CAM è divenuta cogente in virtù dell' art. 18 della Legge 221/2015. Successivamente, la nuova disciplina sui contratti pubblici (D.lgs. 50/2016 e s.m.i. [5]) ha esteso con l'art. 34 questo obbligo anche ai Criteri Ambientali Minimi Edilizia definiti nel D.M. 11/10/2017 "Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici per la gestione dei cantieri della pubblica amministrazione". Per tutte le stazioni appaltanti è previsto l'obbligo di inserire nei bandi, a prescindere dal valore dell'importo, le specifiche tecniche e le clausole contrattuali individuate dallo stesso. Questo garantisce che la politica nazionale in materia di appalti pubblici verdi sia proiettata verso la riduzione degli impatti ambientali, promozione di modelli di produzione e consumo sostenibili e "circolari" e diffusione dell'occupazione "verde".

Nel testo del Decreto si legge: "i professionisti incaricati, ciascuno per le proprie competenze, devono dare evidenza del rispetto dei requisiti, sia in fase di progetto iniziale che in fase di verifica finale della conformità, consegnando rispettivamente un progetto acustico e una relazione di collaudo redatta tramite misure acustiche in opera, ai sensi delle norme UNI 11367, UNI 11444 e UNI 11532:2014 o norme equivalenti che attestino il raggiungimento della classe acustica qui richiesta".

Per quel che concerne nello specifico il settore scolastico, il Decreto indica che i valori dei requisiti acustici passivi dell'edificio "devono soddisfare il livello di «prestazione superiore» riportato nel prospetto A.1 dell'Appendice A della norma 11367. Devono essere altresì rispettati i valori caratterizzati come «prestazione buona» nel prospetto B.1 dell'appendice B alla norma UNI 11367" [6]. "Gli ambienti interni devono essere idonei al raggiungimento dei valori indicati per i descrittori acustici riportati nella norma UNI 11532. I descrittori acustici da utilizzare sono: quelli definiti nella UNI 11367 per i requisiti acustici passivi delle unità immobiliari; almeno il tempo di riverberazione e lo STI per l'acustica interna agli ambienti di cui alla UNI 11532" [7-8].

2.2 NORME TECNICHE

L'identificazione dei valori di riferimento, dei criteri per la progettazione e per la verifica dei requisiti acustici dell'edilizia scolastica è basata su una serie di norme tecniche recentemente aggiornate. Oltre ad un adeguamento in termini di metodologie, formulazioni e campi di applicazione, tali aggiornamenti recenti hanno messo in evidenza l'esigenza di orientare la progettazione e la ristrutturazione ai bisogni dei soggetti fragili, ad esempio con deficit uditivi.

Nelle linee guida per la progettazione degli ambienti scolastici pubblicate dall'Associazione Italiana di Acustica [9] è riportato il corpus delle principali norme tecniche contenenti indicazioni per il settore dell'edilizia scolastica. Di seguito sono presentate le norme tecniche più rilevanti richiamate nei riferimenti legislativi, i cui dettagli sui valori di riferimento e sulle metodologie di calcolo e verifica sono forniti al capitolo 3.

2.2.1 UNI 11367 "Acustica in edilizia – Classificazione acustica delle unità immobiliari – Procedura di valutazione e verifica in opera"

La norma fornisce ad utenti finali e progettisti indicazioni sulla qualità acustica degli edifici tramite il metodo della classificazione acustica delle unità immobiliari. Tale classificazione è basata sulla misurazione dei requisiti acustici passivi degli edifici.

La classificazione non è applicabile all'edilizia scolastica, ma in Appendice la norma fornisce valori di riferimento su requisiti che riguardano il fonoisolamento e la rumorosità degli impianti, suddivisi in prestazioni di base e superiori, e requisiti di intelligibilità del parlato.

Requisiti di fonoisolamento sono previsti fra due aule adiacenti e fra due aule sovrapposte, e fra un'aula e il corridoio. Inoltre, la norma prevede requisiti diversi fra ambienti scolastici appartenenti a due distinte unità immobiliari, come il D.P.C.M. 5/12/1997, e fra ambienti scolastici appartenenti alla stessa unità immobiliare come nel caso di due aule scolastiche.

Per ciò che riguarda la rumorosità degli impianti, la norma prevede valori limite dei livelli sonori immessi da impianti a funzionamento sia continuo sia discontinuo. Nel caso specifico di aule scolastiche, il livello sonoro immesso si riferisce a impianti presenti in ambienti diversi dall'ambiente servito.

2.2.2 UNI 11532 "Acustica in edilizia – Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati – Metodi di progettazione e tecniche di valutazione"

La norma UNI 11532 è costituita dalla parte 1, in cui sono indicati i descrittori che rappresentano la qualità acustica di un ambiente, i metodi previsionali e i metodi di verifica, e da parti successive che riportano in modo specifico i descrittori e i rispettivi valori di riferimento in base alla destinazione d'uso. Ad oggi sono state pubblicate la parte 1 e la parte 2 della norma, quest'ultima relativa agli ambienti del settore scolastico.

La norma UNI 11532 parte 2 include requisiti atti a garantire una elevata concentrazione e una comprensione ottimale del parlato negli ambienti scolastici, anche per soggetti fragili quali portatori di deficit uditivi, di concentrazione, i soggetti non madre lingua. Le condizioni acustiche conformi alla norma risultano ottimali anche per gli insegnanti poiché contribuiscono alla riduzione dello sforzo e del carico vocale.

La parte 2 della norma è applicabile al progetto dal nuovo e al rinnovo totale o parziale di edifici scolastici esistenti. Essa prevede inoltre valori di riferimento per la fase di verifica a seguito di gara pubblica (condizione degli ambienti non occupata) e per la fase d'uso (condizione degli ambienti occupati).

Rispetto alla rumorosità presente all'interno degli ambienti scolastici, la norma limita il livello di rumore proveniente da impianti installati all'interno e all'esterno dell'ambiente servito, e anche il livello di rumore complessivo proveniente dagli impianti e dall'ambiente esterno.

Rispetto all'intelligibilità del parlato si distinguono valori di riferimento in funzione del volume dell'ambiente e della presenza di impianti di amplificazione sonora. La qualità acustica è estesa anche ad ambienti nell'edificio scolastico diversi dagli ambienti di apprendimento come le aule e le palestre, quali spazi di collegamento, atri, mense, uffici, biblioteche.

Come nel D.M. 11/10/2017 sui CAM, la norma UNI 11532 parte 2 richiama i requisiti di fonoisolamento della norma UNI 11367 con prestazione superiore fra aule adiacenti e sovrapposte, e con prestazione buona fra aula e corridoio.

Riferimenti bibliografici

1. Legge Quadro sull'inquinamento acustico n. 447 del 26/10/1995.
2. DM 11/10/2017 "Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici per la gestione dei cantieri della pubblica amministrazione".
3. Decreto Ministeriale 02/01/1998 n. 28. Regolamento recante norme in tema di costituzione del catasto dei fabbricati e modalità di produzione ed adeguamento della nuova cartografia catastale.
4. Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici n. 3150 del 22/5/1967, Criteri di valutazione e collaudo dei requisiti acustici degli edifici scolastici.
5. D.lgs. 50/2016 "Codice dei contratti pubblici".
6. Norma Italiana UNI 11367:2010. Acustica in edilizia - Classificazione acustica delle unità immobiliari - Procedura di valutazione e verifica in opera.
7. Norma Italiana UNI 11532-1:2018. Acustica – Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati – Metodi di programmazione e tecniche di valutazione. Requisiti generali.
8. Norma Italiana UNI 11532-2:2020. Acustica – Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati – Metodi di programmazione e tecniche di valutazione. Settore scolastico.
9. Associazione Italiana di Acustica, "Linee guida per una corretta progettazione acustica di ambienti scolastici", a cura di A. Astolfi e M. Garai, 2017.

3. I requisiti acustici

Tra i vari requisiti da soddisfare nella progettazione degli edifici scolastici, quelli acustici rivestono particolare importanza in quanto più direttamente e strettamente connessi con la destinazione d'uso degli ambienti.

La chiarezza della percezione sonora è strettamente legata alla durata della "coda sonora" in ambiente, valutata convenzionalmente con la misura del tempo di riverberazione. Nel caso di ascolto della parola, il contributo della riverberazione sonora deve essere tale per cui si instauri una situazione favorevole di compromesso, secondo cui essa possa contribuire al rinforzo del suono diretto, senza che una durata troppo lunga della coda sonora mascheri i segnali che si succedono nel tempo.

I rumori provenienti dall'ambiente esterno e i rumori generati all'interno di un ambiente ne determinano il rumore di fondo o rumore residuo. I rumori possono mascherare i suoni prodotti da un parlatore e possono disturbare l'ascolto determinando una sensazione uditiva sgradevole e fastidiosa, e quindi uno stato generale di insoddisfazione relativo alle condizioni acustiche.

La presenza di una eccessiva riverberazione e l'elevata rumorosità di fondo riducono l'intelligibilità della parola, intesa come percentuale di parole o frasi correttamente comprese da un ascoltatore rispetto alla totalità delle parole o frasi pronunciate da un parlatore. Essa dipende, oltre che dai fenomeni ambientali citati, anche dalle caratteristiche di emissione della voce umana, in particolare dall'intensità di emissione, variabile con lo sforzo vocale del parlatore. I metodi di valutazione si basano sulla realizzazione di test d'intelligibilità tra parlatori e gruppi di ascoltatori usando frasi o parole in rima, mentre per la valutazione oggettiva si determinano degli indici di intelligibilità ottenuti dalla misura o dal calcolo di parametri connessi alla riverberazione e alla rumorosità di fondo.

Condizioni ottimali di intelligibilità, necessarie in un'aula scolastica, sono definibili in relazione alla destinazione d'uso dell'ambiente e dunque dall'attività svolta dagli occupanti.

3.1 IL TEMPO DI RIVERBERAZIONE

In accordo con la norma UNI EN ISO 3382-2 [1] il tempo di riverberazione si determina a partire dalla curva di decadimento del livello di pressione sonora in funzione del tempo, in un punto dell'ambiente, dopo lo spegnimento di una sorgente sonora. Questo decadimento può essere misurato dopo l'interruzione effettiva di una sorgente stazionaria (rumore a larga banda o a banda limitata) o derivato dall'integrazione all'indietro (a partire dalla fine) del quadrato della risposta all'impulso.

La norma definisce il tempo di riverberazione come il tempo, in secondi, necessario affinché il livello di pressione sonora diminuisca di 60 dB ad un tasso di decadimento (decibel al secondo), indicato dalla regressione lineare dei minimi quadrati della curva di decadimento, su un intervallo da -5 dB e -35 dB al di sotto del livello iniziale. In questo caso il simbolo utilizzato per indicare il tempo di riverberazione è T_{30} . Tuttavia, qualora non sia disponibile un decadimento di 30 dB per la presenza di un eccessivo livello del rumore di fondo, è possibile far riferimento all'intervallo da -5 dB a -25 dB del decadimento del suono. In questo caso il simbolo utilizzato per indicare il tempo di riverberazione è T_{20} .

In Figura 3. 1 è rappresentata la retta di regressione riferita ad un decadimento di 30 dB e il tempo corrispondente letto sull'asse delle ascisse. Per ottenere il T_{30} , l'intervallo temporale (t_2-t_1) è moltiplicato per 2 per rapportarlo ad un decadimento di 60 dB, secondo la definizione convenzionale del tempo di riverberazione.

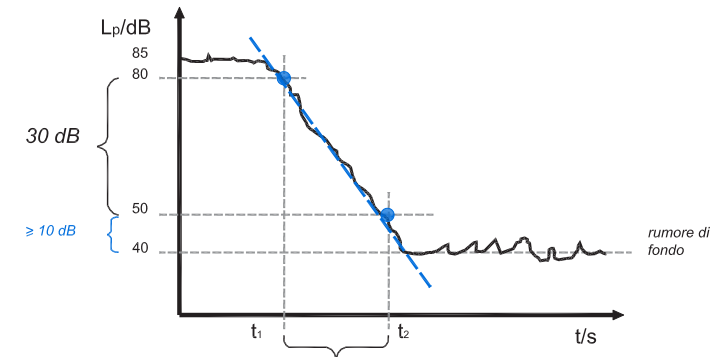


Figura 3. 1 – Determinazione del tempo di riverberazione dalla curva di decadimento. In questo caso l'intervallo considerato al di sotto del livello iniziale è $-5 \div -35$ dB. L'intervallo temporale (t_2-t_1) è moltiplicato per 2 per rapportarlo ad un decadimento di 60 dB, secondo la definizione del tempo di riverberazione.

Il tempo di riverberazione può essere ottenuto anche a partire dalla risposta all'impulso. In particolare, viene ricostruita la curva di decadimento che sarebbe stata prodotta da una sorgente a funzionamento continuo. Questa si ottiene tramite l'integrazione all'indietro della risposta all'impulso quadrata [2].

La risposta all'impulso

La risposta all'impulso in un punto di ricezione rappresenta l'andamento in funzione del tempo della pressione sonora a seguito dell'emissione da parte della sorgente sonora di un impulso di durata estremamente breve (idealmente di durata nulla). In pratica è impossibile generare un impulso di durata nulla, ma brevi suoni transitori possono costituire a fini pratici una buona approssimazione. Tecniche di misura alternative consistono nella generazione di segnali pseudo casuali costituiti da sequenze di massima lunghezza MLS o dalla generazione di un segnale "sweep", composto da una forma d'onda di tipo sinusoidale puro che parte dalle frequenze basse e che sale al trascorrere del tempo [1].

Wallace C. Sabine determinò la legge che lega il tempo di riverberazione alle caratteristiche dell'ambiente, quali il volume e l'area di assorbimento acustico equivalente. Egli individuò tale relazione, nota oggi come la "formula di Sabine", nel tentativo di comprendere cosa rendesse l'acustica della Fogg Lecture Hall non adatta alla sua destinazione d'uso rispetto ad altri ambienti la cui acustica era invece molto rinomata. La formula di Sabine si esprime come:

$$T=0,16 \frac{V}{A_{Tot}} \text{ s}, \quad (3.1)$$

dove:

V = volume dell'ambiente espresso in metri cubi;

A_{Tot} = area di assorbimento acustico equivalente, espressa in metri quadrati.

Area di assorbimento acustico equivalente di un ambiente

La formula per il calcolo dell'area di assorbimento acustico equivalente di un ambiente è la seguente:

$$A_{Tot} = \sum_{i=1}^k a_i S_i + \sum_{j=1}^g n_j A_j + 4mV \text{ m}^2,$$

dove a_i e S_i sono rispettivamente il coefficiente di assorbimento acustico (-) e l'area dell' i -esima superficie presente nell'ambiente, in metri quadrati, k è il numero di superfici, n_j e A_j sono rispettivamente il numero di unità assorbenti del j -esimo tipo e l'assorbimento equivalente (in metri quadrati) di una unità del j -esimo tipo (vedi paragrafo 5.1 per esempi di materiali fonoassorbenti), g è il numero di tipi di unità assorbenti, m è la costante di attenuazione del suono nell'aria (in m^{-1}) e V è il volume dell'ambiente in metri cubi. Il termine $4mV$ rappresenta l'assorbimento del suono nell'aria, trascurabile in ambienti di piccole dimensioni. In grandi ambienti, al contrario, l'assorbimento del suono nell'aria può avere una certa influenza, in particolare alle alte frequenze. I valori di $4m$ (m^{-1}) in funzione della temperatura e dell'umidità dell'aria sono riportati nella tabella seguente.

Umidità relativa (%)	Temperatura (°C)	Frequenze centrali delle bande di ottava (Hz)		
		2000	4000	8000
30	15	0,0143	0,0486	0,136
	20	0,0119	0,0379	0,136
	25	0,0114	0,0313	0,136
50	30	0,0111	0,0281	0,136
	15	0,0099	0,0286	0,086
	20	0,0096	0,0244	0,086

Umidità relativa (%)	Temperatura (°C)	Frequenze centrali delle bande di ottava (Hz)		
		2000	4000	8000
	25	0,0095	0,0235	0,086
	30	0,0092	0,0233	0,086
70	15	0,0088	0,0223	0,06
	20	0,0085	0,0213	0,06
	25	0,0084	0,0211	0,06
	30	0,0082	0,0207	0,06

Il valore ottimale del tempo di riverberazione in un ambiente destinato all'ascolto della parola rappresenta il giusto compromesso tra il raggiungimento di un livello sonoro sufficiente per un'audizione senza sforzo, in tutti i punti dell'ambiente, e l'assenza di mascheramenti tra le sillabe del messaggio parlato. In linea generale, per ambienti destinati all'ascolto della parola, si indicano valori di tempo di riverberazione più brevi rispetto a quelli ideali per sale destinate all'ascolto della musica. Si passa infatti da 0,5 s per il parlato in piccole aule scolastiche a poco più di 2 s per la musica in grandi sale.

Numerosi studi hanno indicato che il tempo di riverberazione ottimale in aule scolastiche di volumetria compresa fra 100 e 400 m^3 , in condizioni di aula occupata, è pari a 0,4-0,5 s nella regione delle medie frequenze. Alcune ricerche recenti hanno messo in relazione il tempo di riverberazione con lo sforzo vocale degli insegnanti, individuando in un intervallo ottimale compreso tra 0,7-0,8 s il valore ottimale. Non sembra utile dunque ridurre il tempo di riverberazione a valori eccessivamente bassi, infatti l'intelligibilità della parola non è molto sensibile a piccole deviazioni rispetto al valore ottimale stabilito; è da segnalare inoltre che una riduzione eccessiva della riverberazione implica una riduzione del livello sonoro dell'insegnante verso il fondo dell'aula [3].

In Italia, la norma di riferimento sull'edilizia scolastica pubblica è la recente norma tecnica UNI 11532-2 [4] che è citata nel DM dell'11 ottobre 2017 in tema di Criteri Ambientali Minimi (CAM) [5].

La UNI 11532-2 rimanda alla UNI 12354-6 [6] per il calcolo in fase previsionale del tempo di riverberazione. Per quanto riguarda i limiti di riferimento, essa considera un intervallo di conformità, determinato a partire dal calcolo del tempo di riverberazione ottimale T_{ott} in relazione all'attività cui l'ambiente è destinato (Tabella 3. 1), mediante le formule riportate in Tabella 3. 2 e indica dei valori di indirizzo che ne specificano l'andamento in frequenza (Tabella 3. 3).

Data la specificità delle formule per il calcolo del valore di riverberazione ottimale per gli ambienti appartenenti alla categoria A6, si rimanda al testo normativo.

Categoria	Attività in ambiente
A1	Musica
A2	Parlato /conferenza
A3	Lezione/comunicazione come parlato/ conferenza (aule grandi) interazione insegnante studente
A4	Lezione/comunicazione, incluse aule speciali
A5	Sport
A6	Aree e spazi non destinati all'apprendimento e biblioteche

Tabella 3. 1 - Categorie degli ambienti in relazione all'attività.

Categoria	Ambiente	T _{ott}	Volume
A1	Occupato all' 80%	$T_{ott,A1} = (0,45\log V + 0,07)$	$30 \text{ m}^3 \leq V < 1000 \text{ m}^3$
A2		$T_{ott,A2} = (0,37\log V - 0,14)$	$50 \text{ m}^3 \leq V < 5000 \text{ m}^3$
A3		$T_{ott,A3} = (0,32\log V - 0,17)$	$30 \text{ m}^3 \leq V < 5000 \text{ m}^3$
A4		$T_{ott,A4} = (0,26\log V - 0,14)$	$30 \text{ m}^3 \leq V < 500 \text{ m}^3$
A5	Non occupato	$T_{ott,A5} = (0,75\log V - 1,00)$ $T_{ott,A5} = 2,00$	$200 \text{ m}^3 \leq V < 10000 \text{ m}^3$ $V \geq 10000 \text{ m}^3$

Tabella 3. 2 - Formule di calcolo di T_{ott} per le categorie da A1 a A5.

Limite	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Superiore	1,45*T _{ott}	1,20*T _{ott}	1,20*T _{ott}	1,20*T _{ott}	1,20*T _{ott}	1,20*T _{ott}
Inferiore	0,65*T _{ott}	0,80*T _{ott}	0,80*T _{ott}	0,80*T _{ott}	0,80*T _{ott}	0,65*T _{ott}

Tabella 3. 3 - Andamento in frequenza del tempo di riverberazione ottimale.

Per la destinazione d'uso A5 si considerano soltanto i valori di indirizzo delle bande d'ottava tra 250 Hz e 2000 Hz.

Il grafico in Figura 3. 2 illustra, a titolo esemplificativo, il calcolo del T_{ott} e del relativo intervallo di conformità per ambienti di dimensioni differenti, rispettivamente per volume V pari a 200 m³ (in blu) e 400 m³ (in rosso).

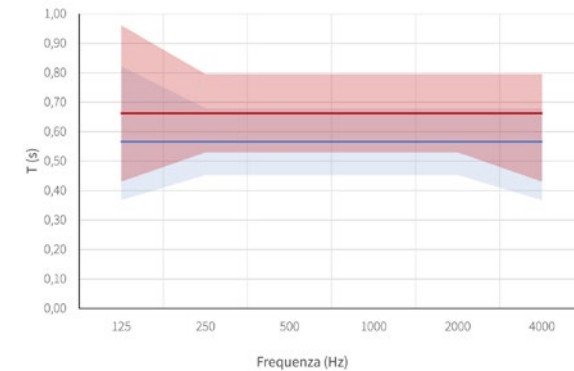


Figura 3. 2 - Confronto fra gli intervalli di conformità calcolati secondo la UNI 11532-2 per ambienti di dimensioni differenti.

La normativa specifica che l'intervallo di conformità si riferisce a un'occupazione convenzionale dell'ambiente pari all'80% per le categorie A1, A2, A3, A4 e, per permettere il confronto con i limiti di riferimento, indica l'equazione (3.2) per la conversione tra i valori allo stato arredato e non occupato (T_{inocc}), come al momento della verifica secondo la UNI EN ISO 3382-2, e i valori allo stato arredato e occupato (T_{occ}) :

$$T_{occ} = \frac{T_{inocc}}{1 + \frac{\Delta A_{pers} T_{inocc}}{0,16 V}} \quad s, \quad (3.2)$$

Per la sola verifica, il confronto con i valori di riferimento è possibile previa correzione con l'incertezza di misura in accordo alla norma UNI 11532-2.

Il D.P.C.M. 5/12/1997 [7] resta, invece, il riferimento normativo da considerare per l'acustica degli edifici scolastici non pubblici. Il decreto del '97 rimanda alla Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici N. 3150 del 22/05/1967 [8], recante i criteri di valutazione e collaudo dei requisiti acustici negli edifici scolastici. La Circolare non fa riferimento a un intervallo di conformità, bensì indica che la media dei tempi di riverberazione misurati alle frequenze 250 – 500 – 1000 – 2000 Hz non deve superare 1,2 s ad aula arredata, con la presenza di due persone al massimo. Nelle palestre la media dei tempi di riverberazione non deve superare 2,2 s, ed eventuali aule per musica e spettacolo devono adeguarsi, per quanto riguarda il trattamento acustico, alle norme generali per le sale di spettacolo.

3.2 IL LIVELLO DEL RUMORE DI FONDO

Il livello del rumore di fondo è uno dei principali parametri da controllare per garantire la buona comprensione della parola e un buon comfort acustico all'interno degli ambienti scolastici.

In Figura 3.3 sono rappresentate alcune delle possibili sorgenti sonore che costituiscono il rumore di fondo all'interno di un ambiente. L'indice di valutazione è il livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata A del rumore di fondo, L_{Aeq,T} (vedi paragrafo 1.2). Adottando il livello sonoro continuo equivalente l'effetto disturbante del rumore viene correlato al contributo energetico medio in un intervallo di tempo, piuttosto che all'energia sonora istantanea effettivamente percepita.

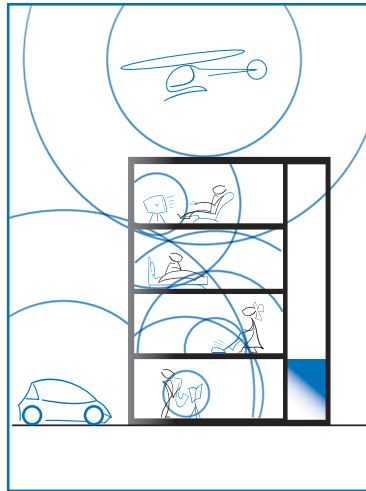


Figura 3.3 - Sorgenti sonore che determinano il rumore di fondo all'interno di un ambiente.

In fase di progetto si determina il livello globale ponderato A del rumore di fondo, $L_{p(A)tot}$, come somma logaritmica dei livelli di pressione sonora dovuti alle diverse tipologie di rumore in ambiente, nelle diverse bande di ottava o terzi d'ottava, secondo la formula seguente:

$$L_{p(A)tot} = 10 \log \left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{p(A)_i}}{10}} \right) \text{ dB(A)}, \quad (3.3)$$

dove $L_{p(A)_i}$ sono i livelli di pressione del rumore di fondo, L_{p_i} , alle diverse frequenze, corretti secondo la curva di ponderazione "A".

Ciascun livello L_{p_i} è ottenuto secondo la seguente formula:

$$L_{p_i} = 10 \log \left(\sum_{j=1}^n 10^{\frac{L_{p_{ij}}}{10}} \right) \text{ dB}, \quad (3.4)$$

dove:

L_{p_i} = livello di pressione sonora globale alla i-esima banda di frequenza, in decibel;

$L_{p_{ij}}$ = livello di pressione del j-esimo tipo di rumore alla i-esima banda di frequenza, in decibel.

Correzione dei livelli di pressione sonora secondo la curva di ponderazione "A"

Frequenza (Hz)	Curva A (dB)
31,5	-39,4
40	-34,6
50	-30,2
63	-26,2
80	-22,5
100	-19,1
125	-16,1
160	-13,4
200	-10,9
250	-8,6
315	-6,6
400	-4,8
500	-3,2
630	-1,9
800	-0,8
1000	0
1250	0,6
1600	1,0
2000	1,2
2500	1,3
3150	1,2
4000	1,0
5000	0,5
6300	-0,1
8000	-1,1
10000	-2,5
12500	-4,3
16000	-6,6
20000	-9,3

Picard e Bradley [3] riportano la variazione del livello di rumore fondo in funzione del grado scolastico confrontando dati misurati da diversi autori. La Figura 3.4 tratta dalla loro pubblicazione, mostra come il maggiore livello sonoro si riscontri nelle scuole per l'infanzia e il minore all'università. I due autori hanno inoltre determinato criteri di accettabilità del rumore di fondo suddivisi per fasce di età e per capacità uditiva. Per ascoltatori normoudenti il valore massimo del livello di rumore di fondo può variare da 40 dB(A), per bambini oltre i 12 anni, fino a 28,5 dB(A), per bambini di 6-7 anni; i valori si riducono rispettivamente a 33 dB(A) e 21,5 dB(A) nel caso di ascoltatori con problemi di udito (legati a difetti fisici o ad altre cause).

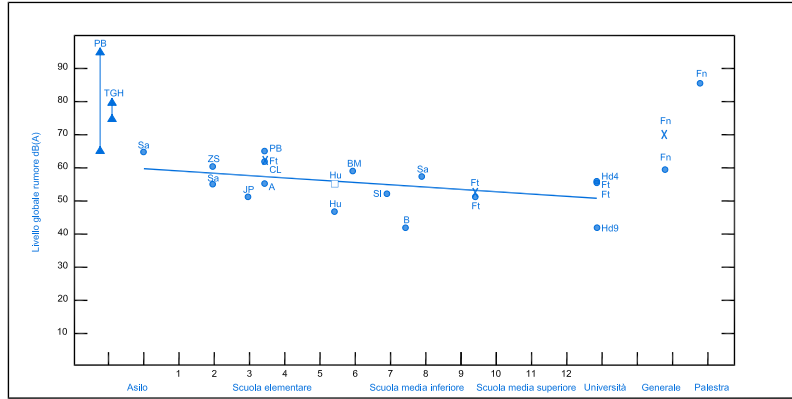


Figura 3. 4 - Livelli di rumore di fondo misurati in aule scolastiche occupate, tratto da [3]. Le diverse sigle corrispondono a dati misurati da diversi autori.

Una delle sorgenti principali di rumore esterno è senz'altro il rumore da traffico veicolare, e in minor misura, quello da traffico ferroviario e aeroportuale. In Italia, il D.P.R. n. 142 del 2004 [9] definisce, nelle fasce di pertinenza di autostrade, strade extraurbane principali, strade extraurbane secondarie e strade urbane di scorrimento, un livello limite di immissione nel periodo diurno in prossimità di scuole, pari a 50 dB(A). Le fasce di pertinenza variano da un'ampiezza di 250 m, per le strade a scorrimento più veloce, a un'ampiezza di 50 m, per quelle a minor traffico veicolare. Nel caso di strade urbane di quartiere e strade locali, i valori limite sono quelli previsti dal DPCM 14/11/1997 [10] per le diverse zone acustiche. Qualora questi livelli di immissione non fossero rispettati, è comunque stabilito un valore limite relativo al livello sonoro all'interno degli ambienti, pari a 45 dB(A) $L_{Aeq,diurno}$, misurato al centro della stanza ad aula vuota e finestre chiuse.

Valori limite assoluti di immissione riferiti al rumore immesso nell'ambiente esterno dall'insieme di tutte le sorgenti (D.P.C.M. 14/11/97 "Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore")		
Classi di destinazione d'uso del territorio	Tempi di riferimento	
	Diurno (06:00 – 22:00)	Notturno (22:00 – 06:00)
I aree particolarmente protette	50	40
II aree prevalentemente residenziali	55	45
III aree di tipo misto	60	50
IV aree di intensa attività umana	65	55
V aree prevalentemente industriali	70	60
VI aree esclusivamente industriali	70	70

Per la determinazione del rumore da traffico all'esterno dell'edificio scolastico esistono modelli di calcolo dettagliati che prendono in considerazione il traffico veicolare orario, la velocità media del traffico, la percentuale di veicoli pesanti e altre informazioni che riguardano la topografia della strada o la presenza di superfici riflettenti, ad esempio edifici nelle vicinanze, o di barriere [11], sebbene in caso di condizioni di traffico complesse o inusuali, la necessità di misure *in situ* resta necessaria per una corretta valutazione.

Il rumore ferroviario è regolamentato dal D.P.R. n. 459 del 1998 [12]. Il decreto stabilisce che nel caso di infrastrutture ferroviarie di nuova costruzione con una velocità di progetto superiore a 200 km/h, entro la fascia di pertinenza di 250 m, il valore limite di immissione del rumore in prossimità di scuole debba essere pari a 50 dB(A) nel periodo diurno. Qualora questi livelli non possano essere rispettati, è stabilito un valore limite all'interno degli ambienti pari a 45 dB(A) $L_{Aeq,diurno}$, misurato ad aula vuota a finestre chiuse al centro della stanza.

Nel caso del rumore dovuto a traffico aereo il DM 31/10/1997 [13] prevede l'individuazione di tre zone, denominate A, B e C, all'interno dell'area interessata dalle attività aeroportuali, in funzione del valore assunto dall'indicatore L_{VA} . Tale indicatore corrisponde al livello energetico medio sulle tre settimane dell'anno di maggior movimento, dovuto al solo contributo del passaggio di aeromobili. In particolare nella zona A, caratterizzata da $L_{VA} \leq 65$ dB(A), non vi sono limitazioni ad attività umane; nella zona B, con $L_{VA} \leq 75$ dB(A), sono consentite esclusivamente attività agricole ed allevamenti di bestiame, attività industriali e assimilate, attività commerciali, attività di ufficio, terziario e assimilate, previa adozione di adeguate misure di isolamento acustico; mentre nella zona C, con $L_{VA} > 75$ dB(A), sono consentite esclusivamente le attività connesse con l'uso ed i servizi delle infrastrutture aeroportuali. Al di fuori delle zone A, B e C l'indice L_{VA} non può superare il valore di 60 dB(A).

La rumorosità interna, ad esclusione del rumore generato dagli occupanti, riguarda principalmente gli impianti di riscaldamento, aerazione e condizionamento, e gli impianti di illuminazione.

Per la valutazione della rumorosità degli impianti di edifici scolastici pubblici si fa riferimento alle indicazioni fornite dalla UNI 11367 [14] e la UNI11532-2 poiché entrambe citate nel DM dell'11 ottobre 2017 in tema di Criteri Ambientali Minimi (CAM) (vedi paragrafo 2.1.3).

La UNI 11367 distingue i servizi a funzionamento continuo, come gli impianti di riscaldamento, aerazione e condizionamento, dai servizi a funzionamento discontinuo, come gli ascensori, gli scarichi idraulici, i bagni, i servizi igienici e la rubinetteria. Per gli edifici adibiti ad attività scolastiche, la norma stabilisce un limite pari a 28 dB(A) di livello sonoro massimo corretto immesso da impianti a funzionamento continuo, L_{IC} , e un limite pari a 34 dB(A) di livello sonoro massimo corretto immesso da impianti a funzionamento discontinuo L_{ID} (Tabella 3. 4). In entrambi i casi, il livello sonoro immesso si riferisce a impianti presenti in ambienti diversi dall'ambiente servito.

Requisito acustico	Valore di riferimento (dB(A))
Livello sonoro corretto immesso da impianti a funzionamento continuo, L_{IC} in ambienti diversi da quelli di installazione	≤ 28
Livello sonoro massimo immesso da impianti a funzionamento discontinuo, L_{ID} in ambienti diversi da quelli di installazione	≤ 34

Tabella 3. 4 - Valori di riferimento per L_{IC} e L_{ID}

La norma UNI 11532-2 indica i valori limite del livello di rumore in ambiente e del livello di rumore prodotto dagli impianti presenti nell'ambiente oggetto di studio, ad esempio i ventilconvettori e le bocchette di ventilazione. Il rumore invece dovuto agli impianti e proveniente da ambienti diversi da quello servito è soggetto al rispetto dei requisiti acustici indicati dalla norma UNI 11367.

La norma disciplina anche il livello di rumore ambientale, L_{amb} , nell'ambiente oggetto di studio, che tiene conto di due contributi:

- il rumore a impianti spenti, proveniente dall'esterno e legato al contesto ambientale in cui si inserisce l'edificio scolastico, denominato rumore residuo
- il rumore degli impianti ad uso e servizio dell'ambiente di analisi.

L_{amb} è la somma energetica di entrambi i contributi e la Tabella 3. 5 ne riporta i valori di riferimento, in relazione alla destinazione d'uso.

Destinazione d'uso	L_{amb} (dB(A))
Aule e Biblioteche < 250 m ³	≤ 38
Aule e Biblioteche ≥ 250 m ³	≤ 41
Ufficio singolo	≤ 38
Ambienti espositivi, spazi di studio	≤ 48
Palestre, piscine, uffici amministrativi, laboratori, aree aperte al pubblico, mense, corridoi, reception / area desk	≤ 48

Tabella 3. 5 - Valori di riferimento per il livello di rumore in ambiente L_{amb} .

Il livello di rumore residuo in ambiente si ottiene a partire dal livello medio di pressione sonora nell'ambiente interno dovuto al rumore esterno L_2 , secondo l'equazione (3.5):

$$L_2 = L_{1,2m} - D_{2m,nT} + 10\log(T/T_0) \text{ dB}, \quad (3.5)$$

dove:

L_2 è il livello medio di pressione sonora nell'ambiente interno dovuto al rumore esterno, in dB;
 $L_{1,2m}$ è livello di pressione sonora all'esterno dell'edificio, alla distanza di 2 m dalla facciata, in dB;
 $D_{2m,nT}$ è l'isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione, in dB in accordo con la UNI EN 12354-3[15];
 T è il tempo di riverberazione, s;
 T_0 è 0,5 s per tutte le bande di ottava.

Se il livello di pressione sonora all'esterno $L_{1,2m}$ si riferisce a una condizione ante operam ovvero senza considerare l'edificio, occorre incrementare il valore di 3 dB per tutte le bande di frequenza, per tener conto della riflessione sulla facciata.

Per quanto riguarda il livello di rumore prodotto dagli impianti, in fase di progetto, esso deve essere calcolato in accordo con la UNI EN 12354-5 [16].

Il livello di rumore dovuto ad impianti a funzionamento continuo interni all'ambiente servito è espresso dal descrittore $L_{ic,int}$. La norma consente, in alternativa all'uso del descrittore $L_{ic,int}$, di far riferimento alle curve NC, *Noise Criteria* [17] illustrate in Figura 3. 5.

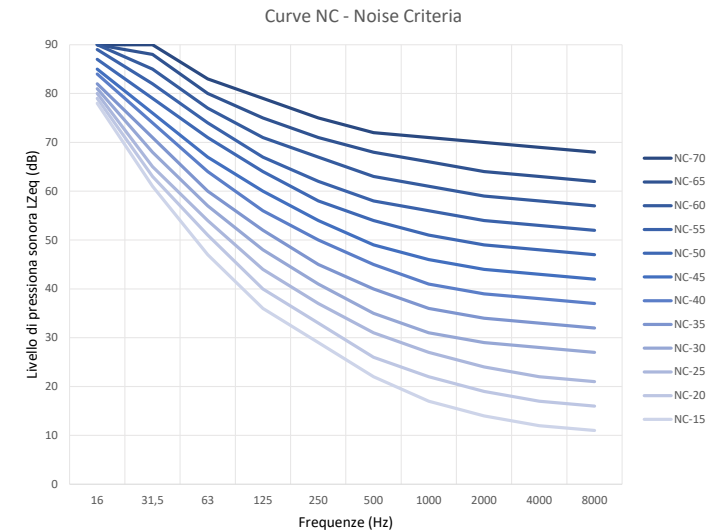


Figura 3. 5 – Curve NC

In Tabella 3. 6 si riportano, in relazione alla destinazione d'uso dell'ambiente di analisi, i valori limite per $L_{ic,int}$ e NC:

Destinazione d'uso	$L_{ic,int}$ (dB(A))	NC
Aule e Biblioteche < 250 m ³	≤ 34	≤ 25
Aule e Biblioteche ≥ 250 m ³	≤ 38	≤ 30
Ufficio singolo	≤ 35	≤ 25
Ambienti espositivi, spazi di studio	≤ 45	≤ 35
Palestre, piscine, uffici amministrativi, laboratori, aree aperte al pubblico, mense, corridoi, reception / area desk	≤ 45	≤ 35

Tabella 3. 6 - Valori di riferimento per $L_{ic,int}$ e NC.

Il descrittore $L_{ic,int}$ è ottenuto dalla media energetica spaziale dei valori in ciascuna delle posizioni indicate in Figura 3. 6 o per ambienti diversi dalle aule nelle posizioni utente, corretti rispetto al rumore di fondo ed al tempo di riverberazione

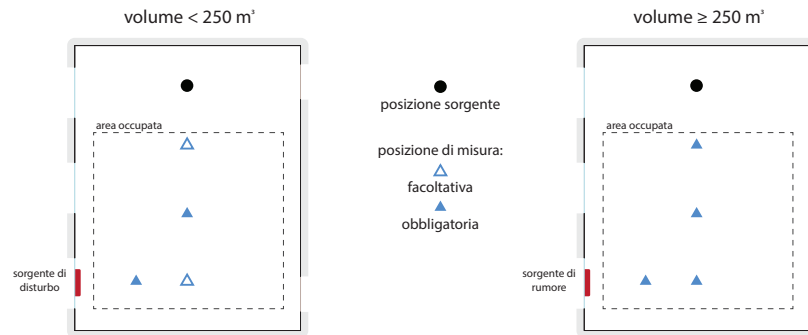


Figura 3. 6 – “Posizioni di misura” in relazione alla sorgente del segnale del parlato e volume dell’ambiente di analisi e/o misura.

Il livello di rumore dovuto ad impianti a funzionamento discontinuo interni all’ambiente servito è espresso dai descrittori $L_{id,int}$ e $L_{pu,max}$, in Tabella 3. 7 si riportano i valori di riferimento.

Tabella 3. 7 - Valori di riferimento per $L_{id,int}$ e $L_{pu,max}$.

Tipologia d’impianto	$L_{id,int}$ (dB(A))	$L_{pu,max}$ (dB(A))
Cappa di aspirazione fissa per portate fino a 250 m³/ora	≤ 65	≤ 66

Il descrittore $L_{id,int}$ è ottenuto dalla media energetica spaziale dei valori misurati per ciascuna delle posizioni indicate in Figura 3. 6 o per ambienti diversi dalle aule nelle posizioni utente, corretto rispetto al tempo di riverberazione.

Il confronto con i valori di riferimento è possibile previa correzione con l’incertezza di misura in accordo alla norma UNI 11532-2.

Il D.P.C.M. 5/12/1997 [7] resta, invece, il riferimento normativo da considerare la valutazione della rumorosità degli impianti degli edifici scolastici non pubblici.

In tutti i casi previsti dal decreto, la sorgente di rumore deve essere esterna all’ambiente di studio. Sono esclusi quindi i ventilconvettori e le bocchette di ventilazione interne all’ambiente. Per gli edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli, il decreto stabilisce un limite pari a 25 dB(A) di livello di pressione sonora equivalente ponderata A, L_{Aeq} , per i servizi a funzionamento continuo e un limite pari a 35 dB(A) di livello massimo di pressione sonora ponderata A con costante di tempo slow, L_{ASmax} , per i servizi a funzionamento discontinuo.

Nell’esecuzione delle misure acustiche di rumore è possibile settare diverse costanti di tempo: la costante di tempo “S” (Slow), pari a 1 secondo, riduce l’entità e la rapidità delle fluttuazioni, la costante “F” (Fast), pari a 125 millisecondi, permette di seguire le variazioni relativamente rapide del segnale. Altre costanti sono destinate al rilevamento dei rumori di tipo impulsivo: la costante “I” (Impulse) è caratterizzata da una rapida risposta in salita, pari a 35 ms, e da una discesa più lenta, pari a 3 s, per consentire la lettura dei valori raggiunti in salita, mentre la costante “P” (Peak) è caratterizzata da un tempo di salita brevissimo per consentire la lettura del valore di picco degli eventi sonori impulsivi.

La Tabella 3. 8 riassume i valori limite dei livelli di pressione all’interno di aule scolastiche non occupate specificati dalla legislazione italiana vigente per edifici scolastici relativi al rumore da traffico veicolare e ferroviario e al rumore degli impianti in accordo con il D.P.C.M. 5/12/97.

Tabella 3. 8 - Valori limite del livello di pressione all’interno di aule scolastiche non occupate.

Tipologia di rumore	L_{Aeq} (dB(A))	L_{Amax} (dB(A))	Riferimento normativo
Rumore da traffico veicolare	45	-	D.P.R. n. 142 del 2004
Rumore da traffico ferroviario	45	-	D.P.R. n. 459, 18/11/98
Rumore degli impianti	25 (funzionamento continuo)	35 (funzionamento discontinuo)	D.P.C.M. 05/12/1997

Molti impianti di condizionamento a funzionamento continuo producono un rumore caratterizzato da uno spettro particolarmente sbilanciato verso le basse frequenze. La valutazione di questo tipo di rumore, facendo riferimento al solo livello $L_{Aeq,T}$, sottostimerebbe il disturbo ad esso associato. Valutazioni sul bilanciamento dello spettro possono effettuarsi con criteri definiti dalle curve RC, Room Criteria [17], che forniscono inoltre informazioni sul grado di interferenza del rumore con il messaggio parlato e sulle vibrazioni percepibili indotte in strutture leggere dalle componenti energetiche alle basse frequenze.

Il controllo della rumorosità alle basse frequenze è importante anche per i bambini con problemi di udito che tendono ad utilizzare segnali al di sotto di 500 Hz per trarre informazioni sul segnale verbale [18].

3.3 L’ ISOLAMENTO ACUSTICO DI FACCIATA

La protezione dell’ambiente scolastico dai rumori provenienti dall’esterno è particolarmente critica quando la scelta del sito dove si colloca l’edificio scolastico non può essere opportunamente pianificata (vedi paragrafo 4.1). In generale l’isolamento acustico di facciata, insieme a quello tra ambienti interni, rappresenta il primo parametro da controllare per la riduzione del rumore di fondo negli ambienti.

Per facciata si intende la totalità della superficie esterna di un ambiente. Essa può essere composta da diversi elementi, quali ad esempio una finestra, una porta, una parete opaca, un sistema di aerazione. La trasmissione sonora attraverso la facciata è dovuta alla trasmissione sonora da ciascuno di tali elementi. In generale, la presenza di elementi 'deboli' acusticamente, quali finestre e aperture per la ventilazione, influenza fortemente il valore finale dell'isolamento acustico della facciata.

La prestazione di una facciata in termini di isolamento acustico può essere espressa dall'indice di valutazione dell'isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione, $D_{2m,nT,w}$.

In accordo con la norma UNI EN ISO 16283-3 [19] l'isolamento acustico di facciata, D_{2m} , è definito come la differenza fra il livello di pressione sonora misurato all'esterno, alla distanza di 2 m dalla facciata, ed il livello di pressione sonora nell'ambiente ricevente. Il pedice nT (normalizzato rispetto al tempo di riverberazione) indica che il livello nell'ambiente ricevente è riferito ad un locale con tempo di riverberazione pari a 0,5 s, secondo la formula che segue:

$$D_{2m,nT} = L_{1,2m} - L_2 + 10 \lg \frac{T}{T_0} \text{ dB}, \quad (3.6)$$

dove:

$L_{1,2m}$ = livello di pressione sonora alla distanza di 2 m dalla facciata, in decibel;

L_2 = livello di pressione sonora nell'ambiente ricevente, in decibel;

T = tempo di riverberazione nell'ambiente ricevente, in secondi;

T_0 = tempo di riverberazione di riferimento, pari a 0,5 s.

Le misure si eseguono per le bande di ottava con frequenza di centro banda compresa fra 125 Hz e 2000 Hz, oppure per le bande di un terzo d'ottava con frequenza di centro banda compresa da 100 Hz a 3150 Hz. Dai valori in frequenza si ottiene l'indice di valutazione $D_{2m,nT,w}$ secondo il metodo specificato nella norma UNI EN ISO 717-1 [20].

La procedura prevede di far scorrere la curva di riferimento per passi di 1 dB rispetto alla curva sperimentale di R, R', $D_{2m,nT}$, etc., fino a quando la somma degli scarti sfavorevoli (si hanno quando il risultato sperimentale è inferiore al valore di riferimento), diventa più grande possibile, ma non superiore a 32 dB, per misurazioni effettuate in 16 bande di un terzo d'ottava, o a 10 dB, per misurazioni effettuate in 5 bande di ottava. Quando si verifica questa condizione il valore dell'indice di valutazione si legge sulla curva di riferimento in corrispondenza della frequenza di 500 Hz.

La norma UNI EN ISO16283-3 specifica due serie di metodi per la misurazione dell'isolamento al rumore aereo di un'intera facciata: il metodo globale con il traffico stradale e il metodo con altoparlante. Il primo è preferibile quando lo scopo della misurazione è la valutazione delle prestazioni di tutta la facciata, inclusi i percorsi laterali, in una determinata posizione relativa alla strada vicina. Tra i requisiti della misurazione vi è che il rumore di fondo nell'ambiente ricevente deve essere almeno 10 dB minore del livello equivalente di pressione sonora misurato e che la durata della misurazione deve contenere almeno 50 passaggi di veicoli. La Figura 3. 7 rappresenta uno schema della misura dell'isolamento di facciata con il metodo del traffico stradale.

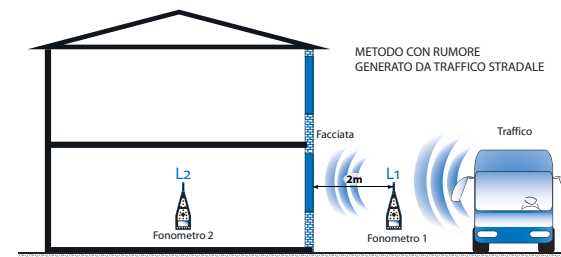


Figura 3. 7 - Schema di misurazione dell'isolamento di facciata con il rumore da traffico stradale (tratto da [21]).

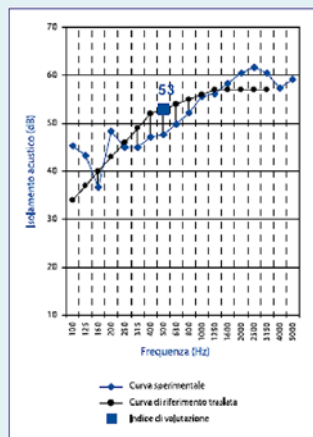
Il metodo con altoparlante è particolarmente utile quando, per varie ragioni pratiche, la sorgente di rumore reale non può essere usata. Nell'appendice D della norma UNI EN ISO 16283-3 vengono descritti anche i metodi di misura con rumore aeronautico e ferroviario. La Tabella 3. 9 riporta una sintesi dei diversi metodi e parametri misurati descritti nella norma UNI EN ISO 16283-3 per la valutazione dell'isolamento di facciata. Per la descrizione della misura si rimanda alla stessa norma tecnica.

La norma prevede anche la determinazione dell'isolamento acustico normalizzato rispetto all'assorbimento acustico, $D_{2m,n}$, definito come l'isolamento acustico corrispondente all'area di assorbimento acustico equivalente di riferimento nell'ambiente ricevente, secondo la seguente relazione:

$$D_{2m,n} = L_{1,2m} - L_2 - 10 \lg \frac{A}{A_0} \text{ dB}, \quad (3.7)$$

Indice di valutazione dell'isolamento acustico per via aerea

Le misurazioni dei requisiti acustici passivi, in opera e in laboratorio, vengono eseguite in funzione della frequenza, generalmente in bande di un terzo di ottava. La necessità di esprimere in modo sintetico tali requisiti ha condotto alla definizione di un metodo per la determinazione di un unico parametro, denominato indice di valutazione, a partire dai valori in frequenza. La norma UNI EN ISO 717-1 descrive il metodo per la determinazione dell'indice di valutazione delle grandezze riferite all'isolamento acustico per via aerea (R, R', $D_{2m,nT}$, etc.), riportando le curve di riferimento per il calcolo dell'indice a partire dai risultati sperimentali in bande di ottava o terzi di ottava.



dove:

A = area di assorbimento acustico equivalente nell'ambiente ricevente, in metri quadrati;

A₀ = area di assorbimento acustico equivalente di riferimento, pari a 10 m².

Valutazione dell'area di assorbimento acustico equivalente

L'area di assorbimento acustico equivalente è determinata a partire dal tempo di riverberazione utilizzando la formula di Sabine:

$$A = \frac{0,16 \cdot V}{T} \text{ m}^2$$

dove:

A = area di assorbimento acustico equivalente, in metri quadrati;

V = volume dell'ambiente ricevente, in metri cubi;

T = tempo di riverberazione nell'ambiente ricevente, in secondi.

Metodo	Campo di applicazione	Parametro misurato
con traffico stradale	Metodo preferibile per stimare il potere fonoisolante globale di una facciata esposta al rumore da traffico stradale	D _{tr,2m,nT} D _{tr,2m,n}
con traffico ferroviario	Metodo preferibile per stimare il potere fonoisolante globale di una facciata esposta al rumore da traffico ferroviario	D _{tr,2m,nT} D _{tr,2m,n}
con traffico aereo	Metodo preferibile per stimare il potere fonoisolante globale di una facciata esposta al rumore da traffico aereo	D _{at,2m,nT} D _{at,2m,n}
con altoparlante	Alternativa agli altri metodi per il potere fonoisolante globale di una facciata	D _{ls,2m,nT} D _{ls,2m,n}

Tabella 3. 9 - Sintesi dei diversi metodi di misura e parametri per a valutazione dell'isolamento di facciata (UNI EN ISO 16283-3).

Per la valutazione dell'indice di isolamento acustico normalizzato di facciata D_{2m,nT,w} per edifici scolastici pubblici si fa riferimento al limite indicato dalla UNI 11367, recepita dal D.M. dell'11 ottobre 2017 in tema di Criteri Ambientali Minimi (CAM), che fissa a 42 dB il valore minimo dell'indice D_{2m,nT,w}.

Il D.P.C.M. 5/12/97 resta invece il riferimento normativo per l'edilizia scolastica privata e stabilisce che il valore minimo ammissibile dell'indice di valutazione D_{2m,nT,w} nel caso di edifici scolastici sia pari a 48 dB. Tale valore limite è più stringente di quello imposto dalla UNI 11367 ed è ormai prassi farvi riferimento nelle gare d'appalto sebbene il suo rispetto implichi difficoltà progettuali e investimenti rilevanti. Infatti, il limite imposto dal decreto del '97 è stabilito per tutti gli edifici scolastici privati indipendentemente dal clima acustico presente nell'area in cui sorge l'edificio e, considerando quanto indicato dal D.P.C.M. 14/11/97 [10], secondo cui le scuole dovrebbero sorgere in Classe I, con livelli sonori di immissione nel periodo diurno inferiori a 50 dB(A), suddetto limite risulta ancor più ingiustificato.

La Tabella 3. 10 riassume i valori minimi dell'indice di valutazione D_{2m,nT,w} indicati dai due riferimenti normativi.

Riferimento normativo	Indice di valutazione	Valore di riferimento (dB)
UNI 11367	D _{2m,nT,w}	≥ 42
D.P.C.M. 5/12/97	D _{2m,nT,w}	≥ 48

Tabella 3. 10 - Valore minimo dell'indice di valutazione dell'isolamento acustico di facciata D_{2m,nT,w} negli edifici scolastici.

I calcoli previsionali per la determinazione dell'isolamento acustico di facciata si eseguono secondo il modello descritto nella norma UNI EN ISO 12354-3 [15].

Il modello di calcolo dettagliato incluso nella UNI EN ISO 12354-3 porta alla determinazione dei valori dell'isolamento di facciata per bande di frequenza, a partire dai quali è possibile ottenere l'indice di valutazione D_{2m,nT,w} in accordo con il metodo descritto nella norma UNI EN 717-1.

Il modello semplificato recepito dalle due norme tecniche può invece essere applicato per calcolare in modo diretto l'indice di valutazione D_{2m,nT,w}, a partire dagli indici di valutazione delle prestazioni degli elementi interessati, secondo la relazione:

$$D_{2m,nT,w} = R'_w + \Delta L_{fs} + 10 \lg \frac{V}{6T_0S} \text{ dB}, \quad (3.8)$$

dove:

R'_w = indice di valutazione del potere fonoisolante apparente della facciata, in decibel;

ΔL_{fs} = differenza del livello di pressione sonora per la forma della facciata, in decibel;

S = area totale della facciata vista dall'interno, in metri quadrati;

T₀ = tempo di riverberazione di riferimento, pari a 0,5 s;

V = volume dell'ambiente ricevente, in metri cubi.

Il potere fonoisolante apparente

Il potere fonoisolante apparente, R' , espresso in decibel, è definito come dieci volte il logaritmo in base dieci del rapporto tra la potenza sonora W_1 , incidente su una parete sottoposta a prova, e la potenza sonora totale trasmessa nell'ambiente ricevente se, in aggiunta alla potenza sonora W_2 trasmessa attraverso il divisorio, la potenza sonora W_3 , trasmessa dagli elementi laterali o da altri componenti, è significativa, secondo la relazione:

$$R' = -10 \log \frac{W_1}{W_2 + W_3} \text{ dB,}$$

dove:

- W_1 = potenza sonora incidente su una parete sottoposta a prova;
- W_2 = potenza sonora trasmessa nell'ambiente ricevente attraverso il divisorio;
- W_3 = potenza sonora trasmessa nell'ambiente ricevente da elementi laterali o da altri componenti.
- W_3 è presa in considerazione qualora tale quota di energia sonora sia significativa.

La trasmissione sonora attraverso la facciata è dovuta alla trasmissione sonora attraverso ciascun elemento di cui è costituita. Si presuppone che la trasmissione attraverso ogni elemento sia indipendente da quella attraverso gli altri elementi.

Il potere fonoisolante apparente, $R'_{w'}$, della facciata è calcolato secondo la seguente relazione:

$$R'_{w'} = -10 \log \left[\sum_{i=1}^n \frac{S_j}{S} \cdot 10^{-\frac{R_{wj}}{10}} + \frac{l_0}{S} \sum_{k=1}^m l_{s,k} \cdot 10^{-\frac{R_{s,wk}}{10}} + \sum_{i=1}^p \frac{A_0}{S} \cdot 10^{-\frac{D_{n,e,w,i}}{10}} \right] - K \text{ dB,} \quad (3.9)$$

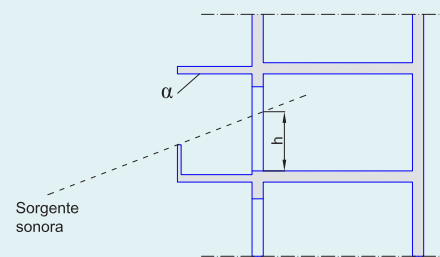
Dove:

- R_{wj} = indice di valutazione del potere fonoisolante dell'elemento j , in decibel;
- S_j = area dell'elemento j , in metri quadrati;
- S = area totale della facciata, vista dall'interno, in metri quadrati;
- $D_{n,e,w,i}$ = indice di valutazione dell'isolamento acustico normalizzato rispetto all' assorbimento acustico di un piccolo elemento i , in decibel;
- K = correzione relativa al contributo della trasmissione laterale, pari a 0 per elementi di facciata non connessi, e pari a 2 per elementi di facciata pesanti con giunti rigidi.
- A_0 = area di assorbimento acustico equivalente di riferimento, pari a 10 m²;
- $R_{s,wk}$ = indice di valutazione del potere fonoisolante della fessura o del giunto, pari a 10 m²;
- $l_{s,k}$ = lunghezza dell'elemento k , in metri;
- l_0 = lunghezza di riferimento pari a 1 metro.

Per giunti o fessure si intendono gli elementi che non fanno parte delle di sistemi costruttivi definiti e testati in base ad altre tipologie di norme di prodotto, come ad esempio i serramenti, dove nel potere fonoisolante misurato è generalmente incluso l'effetto della sigillatura tra controtelaio e muratura.

L'effetto della forma esteriore della facciata può essere sia positivo (trasmissione sonora inferiore) che negativo (trasmissione sonora maggiore). L'effetto positivo è dovuto alla schermatura totale o parziale del piano della facciata per mezzo di balconi o altri aggetti. L'effetto negativo è dovuto a riflessioni supplementari dovute alla forma della facciata in prossimità della stessa quando un balcone forma una chiusura parziale attorno al piano della facciata.

Valori di ΔL_{fs} in funzione di alcune forme della facciata, dell'assorbimento della parte inferiore del balcone e della direzione del rumore incidente [23]



La norma UNI EN ISO 12354-3 fornisce valori di ΔL_{fs} in funzione della forma della facciata, dell'assorbimento acustico della parte inferiore del balcone, $\alpha_{w'}$, dell'altezza di incidenza dell'onda sonora, h (orizzonte visivo sulla facciata), come descritto nella figura a lato

ΔL_{fs} dB	1. facciata piana	2. ballatoio			3. ballatoio			4. ballatoio			5. ballatoio		
Assorbimento $\alpha_{w'}$	Non applicabile	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$	$\leq 0,3$	0,6	$\geq 0,9$
$h < 1,5$ m	0	-1	-1	0	-1	-1	0	0	0	1	Non applicabile		
$1,5 \text{ m} \leq h \leq 2,5$ m	0	Non applicabile			-1	0	2	0	1	3			
$h > 2,5$ m	0	Non applicabile			1	1	2	2	2	3	3	4	6

Il livello di accuratezza delle previsioni del modello di calcolo dipende da molti fattori: l'accuratezza dei dati d'ingresso, l'adattabilità della situazione rispetto al modello, il tipo di elementi e giunti interessati, la geometria della situazione e la qualità dell'esecuzione. Si può tuttavia indicare che la valutazione del metodo a singolo indice evidenzia una deviazione tipo di 1,5 dB. Si suppone che l'errore sia dovuto in larga misura alla mancanza di dati sulle trasmissioni sonore attraverso il telaio, la tenuta dei giunti e delle intercapedini dei serramenti.

3.4 L'ISOLAMENTO AI RUMORI AEREI FRA AMBIENTI ADIACENTI

La necessità di un buon isolamento tra ambienti all'interno delle scuole nasce, oltre che dalla maggiore sensibilità e consapevolezza degli effetti nocivi del rumore sull'apprendimento, anche da una nuova concezione dell'insegnamento che si basa su una maggiore interdisciplinarietà e trasversalità. Alcuni ambienti scolastici sono spesso condivisi, e a ciò si aggiunge la maggiore articolazione dei programmi scolastici che prevede, oltre alle materie tradizionali, altre attività maggiormente "disturbanti" quali attività musicali, teatrali, etc. che richiedono lavoro di gruppo e uso di riproduttori audio e video.

L'isolamento acustico tra ambienti è principalmente espresso in termini di potere fonoisolante apparente, R' , definito in modo analogo a quanto visto nel paragrafo precedente, o di isolamento acustico, D , in conformità alla norma EN ISO 16283-1 [24].

In generale, la potenza sonora trasmessa nell'ambiente ricevente è la somma di diverse componenti. Nella trasmissione del rumore tra ambienti è considerata non solo la trasmissione attraverso la parete in oggetto, ma anche attraverso i percorsi laterali (solai e pareti laterali), che sono responsabili di un forte abbassamento del potere fonoisolante. La Figura 3. 8 descrive uno schema della trasmissione laterale attraverso i solai superiore e inferiore.

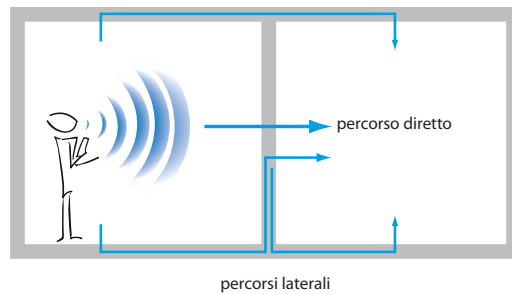


Figura 3. 8 - Percorsi di trasmissione del suono tra ambienti adiacenti: percorso diretto attraverso la parete di separazione e percorsi di trasmissione laterale attraverso i solai (tratto da [25]).

Nell'ipotesi che vi siano campi sonori sufficientemente diffusi nei due ambienti il *Potere fonoisolante apparente* è determinato secondo la seguente relazione:

$$R' = D + 10 \log \frac{S}{A} \text{ dB}, \quad (3.10)$$

dove:

D = isolamento acustico, definito come $D = L_1 - L_2$, in decibel;

S = area dell'elemento divisorio, in metri quadrati;

A = area di assorbimento acustico equivalente nella camera ricevente, in metri quadrati.

La misura del potere fonoisolante apparente in opera, secondo la norma UNI EN ISO 16283-1, prevede l'utilizzo di una sorgente omnidirezionale posta nell'ambiente disturbante e di due fonometri utilizzati per registrare il livello di pressione nell'ambiente disturbante e nell'ambiente ricevente. La Figura 3. 9 illustra uno schema di esecuzione della misurazione.

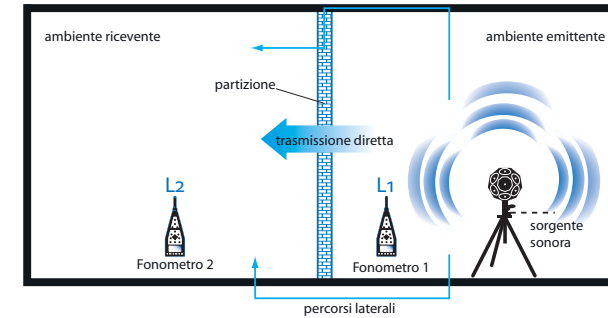


Figura 3. 9 - Schema di misurazione in opera dell'isolamento acustico tra ambienti (schema tratto da [21])

La norma prevede altresì la determinazione dell'*Isolamento acustico normalizzato rispetto al tempo di riverberazione*, D_{nT} , definito come la differenza dei livelli di pressione sonora misurati nei due ambienti, emittente e ricevente, più il termine di normalizzazione, secondo la formula:

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{T}{T_0} \text{ dB}, \quad (3.11)$$

dove T è il tempo di riverberazione nell'ambiente ricevente, in secondi, e T_0 è il tempo di riverberazione di riferimento, che per i locali assimilabili ad abitazioni è pari a 0,5 s.

In modo analogo si definisce l'*Isolamento acustico normalizzato rispetto all'assorbimento equivalente*, secondo la seguente relazione:

$$D_n = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{A}{A_0} \text{ dB}, \quad (3.12)$$

dove:

A = area di assorbimento acustico equivalente dell'ambiente ricevente, in metri quadrati;

A_0 = area di assorbimento acustico equivalente di riferimento; assunta pari a 10 m².

In accordo con la norma UNI EN ISO 16283-1, la misura deve essere eseguita per le bande di ottava comprese da 125 Hz a 2000 Hz oppure per le bande di un terzo d'ottava comprese da 100 Hz a 3150 Hz.

Dalle sopraccitate grandezze, come per la facciata, è possibile ottenere l'indice di valutazione, rispettivamente R'_w per il potere fonoisolante apparente e $D_{nT,w}$ o $D_{n,w}$ per l'isolamento acustico. Il pedice w indica che si tratta di un indice di valutazione a singolo numero, corrispondente al valore in decibel della curva di riferimento a 500 Hz dopo lo spostamento della suddetta curva rispetto alla curva dei valori sperimentali, secondo il metodo specificato nella norma UNI EN ISO 717-1 [20].

Documenti normativi di diversi paesi indicano valori di riferimento per l'isolamento tra ambienti non sempre concordanti. Per il documento inglese BB93 [18], ad esempio, i requisiti di isolamento acustico sono basati sulla classificazione degli ambienti scolastici in funzione della loro tolleranza al rumore e del livello di rumore prodotto nell'ambiente disturbante adiacente. Il BB 93 esprime i valori di isolamento acustico in termini di "Isolamento acustico normalizzato rispetto al tempo di riverberazione" e fissa a 55 dB il limite minimo di riferimento per gli ambienti più sensibili. Per le partizioni tra ambienti scolastici e spazi per la circolazione è previsto un limite inferiore per l'indice del potere fonoisolante R_w (misura di laboratorio ai sensi della norma UNI EN ISO 16283-1), pari a 40 dB per la parete e 30 dB per la porta.

In Italia il riferimento normativo per l'edilizia pubblica sono i CAM del D.M. 11 ottobre 2017, che rimandano alla norma UNI 11367 e stabiliscono:

- un valore superiore a 56 dB dell'indice di valutazione del potere fonoisolante apparente, R'_{w} , riferendo tale prestazione a elementi di separazione fra ambienti di differenti unità immobiliari;
- un valore superiore a 50 dB dell'indice di valutazione dell'isolamento acustico normalizzato, $D_{nT,w}$, riferendo tale prestazione a elementi di separazione fra ambienti adiacenti della stessa unità immobiliare;
- un valore superiore a 55 dB dell'indice di valutazione dell'isolamento acustico normalizzato $D_{nT,w}$, riferendo tale prestazione a elementi di separazione fra ambienti sovrapposti della stessa unità immobiliare.
- un valore superiore a 30 dB dell'indice di valutazione dell'isolamento acustico normalizzato $D_{nT,w}$, riferendo tale prestazione a elementi di separazione fra ambienti collegati mediante accessi o aperture ad ambienti di uso comune o collettivo, ad esempio un corridoio.

Il D.P.C.M. 5/12/97 stabilisce un valore superiore a 50 dB dell'indice di valutazione del potere fonoisolante apparente, R'_{w} , per tutte le categorie di edificio, riferendo tale prestazione a elementi di separazione tra due distinte unità immobiliari senza distinzione fra ambienti adiacenti e sovrapposti. Il decreto non differenzia le prestazioni fra tipologia di componente (verticale, orizzontale, con o senza porta) e non considera il diverso grado di sensibilità al rumore degli ambienti disturbati o il diverso livello di rumore prodotto negli ambienti disturbanti.

In Tabella 3. 11 sono riportati i valori minimi degli indici di valutazione R'_{w} e $D_{nT,w}$ imposti dai riferimenti normativi.

Riferimento normativo	Indice di valutazione	Valore di riferimento (dB)
UNI 11367	R'_{w}	≥ 56
	$D_{nT,w}$	≥ 50 (aule adiacenti)
		≥ 55 (aule sovrapposte)
		≥ 30 (verso ambienti accessori)
D.P.C.M. 5/12/97	R'_{w}	≥ 50

Tabella 3. 11 - Valore minimo dell'indice di valutazione del potere fonoisolante apparente, R'_{w} e dell'isolamento acustico normalizzato, $D_{nT,w}$ negli edifici scolastici.

L'indice di valutazione del potere fonoisolante apparente è determinato in conformità con la UNI EN ISO 717-1[20]: il calcolo deve essere effettuato per bande di ottava da 125 Hz a 2000 Hz o per bande di un terzo d'ottava da 100 Hz a 3150 Hz.

La trasmissione sonora si determina come somma delle trasmissioni (diretta ed indiretta) attraverso alcuni percorsi. Ogni percorso è identificato dall'elemento i su cui il suono è incidente e dall'elemento j radiante nell'ambiente ricevente. I percorsi sono indicati in Figura 3.10, dove nell'ambiente disturbante gli elementi i sono identificati con le lettere F, per gli elementi di fiancheggiamento, e D, per la parete di separazione, mentre nell'ambiente disturbato gli elementi j sono indicati con le lettere f, per gli elementi di fiancheggiamento, e d, per la parete di separazione.

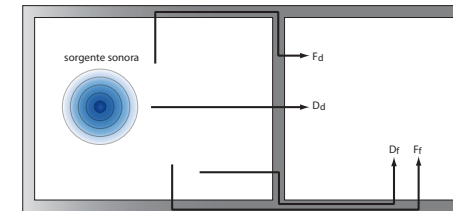


Figura 3. 10 - Definizione dei percorsi di trasmissione sonora ij tra due ambienti adiacenti.

Oltre al percorso diretto Dd , per ogni giunto con gli elementi di laterali, si considerano i percorsi F_f , F_d , e D_f .

Per trasmissione sonora diretta si intende la trasmissione attraverso la sola parete di separazione dovuta sia al suono, incidente su di essa, direttamente irradiato da questa nell'ambiente ricevente, sia al suono trasmesso attraverso percorsi di trasmissione aerea sulla parete stessa, come fessure, dispositivi di passaggio dell'aria, ecc.

Per trasmissione sonora indiretta si intende invece la trasmissione attraverso percorsi diversi rispetto a quello diretto. Essa può essere sia di natura strutturale, se l'energia sonora segue percorsi strutturali attraverso le pareti laterali, il pavimento e il soffitto, sia di natura aerea, se la trasmissione avviene attraverso percorsi di trasmissione aerea come sistemi di ventilazione, controsoffitti sospesi, ecc.

La norma UNI EN ISO 12354-1 [26] descrive due modelli per il calcolo del potere fonoisolante apparente di una partizione verticale o orizzontale a partire da dati di trasmissione sonora diretta e indiretta: un modello dettagliato per il calcolo in funzione della frequenza e un modello semplificato per il calcolo a singolo indice.

Le ipotesi di base della teoria sulla quale si basano i due modelli di calcolo sono quelle dell'analisi energetico-statistica, per cui si ipotizza la distribuzione uniforme dell'energia sonora nei due ambienti, l'assenza di discontinuità strutturali nelle pareti e nei solai interessati e che i percorsi di trasmissione possano essere considerati indipendenti. Entrambi i modelli sono dunque indicati per ambienti che abbiano dimensioni contenute, come potrebbero essere le abitazioni o gli uffici singoli, in edifici con struttura non intelaiata.

La nuova norma UNI 11175-1 [Vedi riferimenti bibliografici a pag. 63 punto A] ripropone il modello di calcolo semplificato e ne descrive l'applicazione alle soluzioni tecniche costruttive nazionali per produrre una corretta qualificazione acustica dell'edificio; la UNI 11175-2 [Vedi riferimenti bibliografici a pag. 63 punto B], invece, dà indicazioni in merito al reperimento e al corretto utilizzo dei dati di ingresso del modello descritto nella Parte 1.

Nelle norme UNI EN ISO 12354 e UNI 11175, il modello proposto per il calcolo dell'indice di valutazione del potere fonoisolante è diversificato in base alla tipologia delle strutture che costituiscono l'edificio. Tale distinzione, che differenzia le strutture in elementi di tipo A ed elementi di tipo B, interessa sia la partizione di separazione, sia gli elementi coinvolti dalla trasmissione laterale.

Le strutture di tipo A sono caratterizzate da un tempo di riverberazione strutturale che risulta principalmente determinato dagli stessi elementi collegati tra loro, e da una riduzione nel livello di vibrazioni di meno di 6 dB sull'elemento nella direzione perpendicolare alla linea del giunto (sino ad almeno la banda di terzo di un ottava di 1000 Hz).

Per gli elementi di Tipo A distinguiamo strutture definite "pesanti" e strutture "leggere". Gli esempi per la prima tipologia comprendono calcestruzzo gettato in opera, legno solido (compresi i pannelli di legno laminato), vetro, plastica, metallo, mattoni/blocchi/lastre con una finitura/copertura (per esempio gesso, rivestimento di intonaco, rivestimento, calcestruzzo) solidamente collegati tra loro. Allo stato attuale solo il CLT(X-LAM o CLT "Cross Laminated Timber") fa parte della seconda tipologia. Nel calcolo della trasmissione laterale la grandezza di riferimento è l'indice di riduzione delle vibrazioni K_{ij} che, per strutture definite «pesanti», dipende dalle masse superficiali degli elementi coinvolti nel giunto, e per strutture «leggere», dipende dal comportamento in frequenza degli elementi che compongono giunto stesso.

Gli elementi di tipo B comprendono qualsiasi elemento che non sia di tipo A, ovvero strutture per quali il tempo di riverberazione strutturale è principalmente determinato dai singoli elementi che compongono il giunto e non è influenzato dagli elementi ad esso collegati, e che abbiano una riduzione del livello di vibrazioni superiore a 6 dB sull'elemento nella direzione perpendicolare alla linea del giunto (almeno nelle bande di un terzo di ottava inferiori a 1000 Hz). Tra gli elementi di tipo B troviamo, ad esempio, le strutture a telaio con rivestimento esterno in legno/cartongesso o metallo. Per questa tipologia di strutture, l'indice di potere fonoisolante per trasmissione laterale, $R_{ij,w}$, di ogni singolo percorso di trasmissione sonora può essere determinato dai rispettivi indici di isolamento acustico normalizzati di trasmissione laterale, $D_{n,f,ij,w}$.

In sintesi, l'associazione di elementi di tipo A a strutture pesanti e di tipo B a strutture leggere non è perfettamente appropriata. La differenza tra i due tipi di elementi sta nella determinazione del contributo della trasmissione laterale per la quale si fa riferimento all'indice di riduzione delle vibrazioni, K_{ij} , per gli elementi di tipo A e all'isolamento medio normalizzato di vibrazioni, $D_{vij,n}$, per gli elementi di tipo B (Figura 3.11). I criteri di scelta sono dati dalle norme UNI EN ISO 12354-1, UNI 11175-1 e UNI EN ISO 10848.

Lo schema in Figura 3.12 riporta la suddivisione degli elementi di tipo A e di tipo B in funzione dell'utilizzo di K_{ij} o $D_{vij,n}$ per il calcolo della trasmissione laterale. Nel modello semplificato a singolo indice, descritto nella norma UNI 11175, il calcolo del K_{ij} e $D_{vij,n}$ in funzione della frequenza viene effettuato assumendo una frequenza di riferimento pari a 500 Hz.

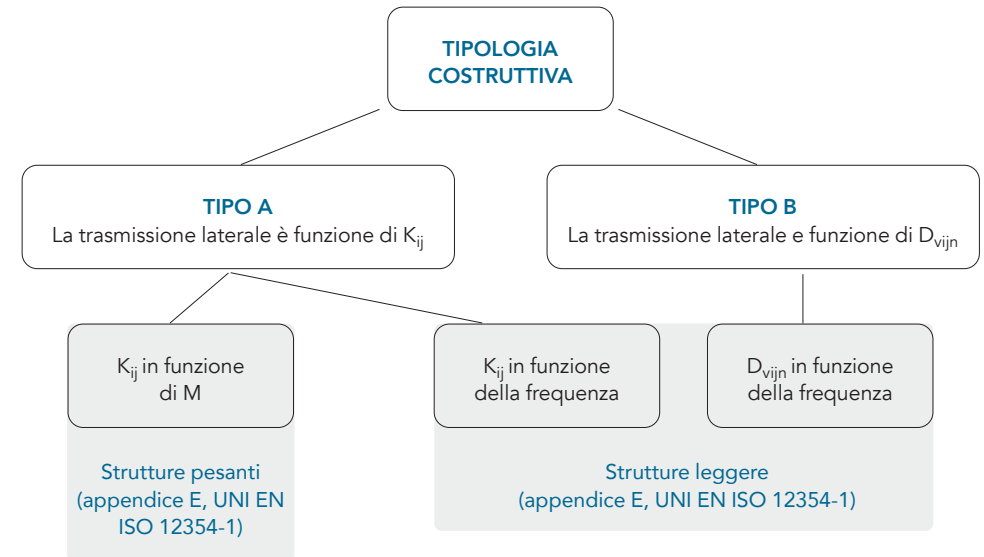


Figura 3.11 – Trasmissione laterale elementi di tipo A e tipo B

L'indice di riduzione delle vibrazioni

L'indice di riduzione delle vibrazioni, K_{ij} , è una grandezza correlata alla trasmissione delle vibrazioni attraverso un giunto tra elementi strutturali, normalizzata per renderla una grandezza invariante. La normalizzazione è effettuata sulla differenza del livello di velocità di vibrazione, mediata direzionalmente attraverso il giunto, alla lunghezza del giunto e alla lunghezza di assorbimento equivalente. K_{ij} è funzione quindi della dimensione del giunto, della differenza di livello della velocità di vibrazione tra i due elementi che concorrono al giunto, quando uno solo dei due è sollecitato, e del tempo di riverberazione strutturale T_s , in s, dei due elementi. Il tempo di riverberazione strutturale per una struttura eccitata con un segnale stazionario, è definito come il tempo in secondi necessario, dal momento in cui viene interrotto il flusso di potenza, perché l'energia di vibrazione si riduca ad un milionesimo del suo valore iniziale.

La grandezza si determina in conformità alla UNI EN ISO 10848-1 [27] e alla UNI EN ISO 10848-4 [28], secondo la seguente formula:

$$K_{ij} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} + \left(10 \log \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i a_j}} \right) \text{ dB}$$

dove:

$D_{v,ij}$ = isolamento di vibrazioni del giunto tra gli elementi i e j, quando l'elemento i è eccitato, in decibel;

$D_{v,ji}$ = isolamento di vibrazioni del giunto tra gli elementi j e i, quando l'elemento j è eccitato, in decibel;

l_{ij} = lunghezza del giunto tra gli elementi i e j, in metri;

a_i = lunghezza di assorbimento equivalente dell'elemento i, in metri;

a_j = lunghezza di assorbimento equivalente dell'elemento j, in metri.

La lunghezza di assorbimento equivalente è data da:

$$a = \frac{2,2 \pi^2 S}{c_0 T_s} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}}$$

dove:

T_s = tempo di riverberazione strutturale dell'elemento i o j, in secondi;

S = area dell'elemento i o j, in metri quadrati;

f = frequenza della banda centrale, in hertz;

f_{ref} = frequenza di riferimento pari a 1000 Hz;

c_0 = velocità del suono in aria, in metri al secondo.

La determinazione degli indici di riduzione delle vibrazioni K_{ij} per le più comuni tipologie di giunzioni tra elementi omogenei si può calcolare a partire dalla massa superficiale degli elementi che si collegano ad angolo retto in corrispondenza del giunto, nel caso in cui gli elementi si mantengano invariati oltre la linea del giunto stesso. In particolare, il calcolo di K_{ij} è effettuato in funzione del logaritmo decimale del rapporto M fra le masse per unità di area delle pareti collegate ad angolo retto fra di loro in corrispondenza del giunto:

$$M = \log \left(m'_{\perp i} / m'_i \right)$$

dove:

$m'_{\perp i}$ è la massa per unità di area dell'altro elemento che costituisce la giunzione perpendicolare all'elemento i, in kg/m^2 ;

m'_i è la massa per unità di area dell'elemento i nel percorso ij, in kg/m^2 ;

Nella tabella seguente sono riportati i valori dell'indice K_{ij} per i più comuni tipi di giunzioni "pesanti" presenti negli edifici, per le quali il valore dell'indice di riduzione delle vibrazioni dipende principalmente dalle masse superficiali delle strutture che confluiscono nel giunto.

Giunzione	Trasmissione	Valori di K_{ij} / dB	
a) Rigida a croce		Diritto	$K_{13} = 8,7 + 17,1 M + 5,7 M^2$
		Angolo	$K_{12} = 8,7 + 5,7 M^2 (=K_{23})$
b) Rigida a T		Diritto	$K_{13} = 5,7 + 14,1 M + 5,7 M^2$
		Angolo	$K_{12} = 5,7 + 5,7 M^2 (=K_{23})$
c) Struttura omogenea e facciata leggera		Diritto	$K_{13} = 5 + 10 M$ (minimo 5 dB)
		Angolo	$K_{12} = 10 + 10 M (=K_{23})$
d) Struttura omogenea con angolo o cambio spessore		Angolo	$K_{12} = 15 M - 3 (=K_{21})$ (minimo -2 dB)
		Cambio spessore	$K_{12} = 5 M^2 - 5 (=K_{21})$
f) Doppia parete leggera e struttura omogenei		Diritto su parete doppia	$K_{13} = 10 + 20 M$ (minimo 10 dB)
		Diritto su parete	$K_{24} = 3 + 14,1 M + 5,7 M^2$ ($m_2/m_1 > 3$)
		Angolo	$K_{12} = 10 + 10 M (=K_{23})$

Per strutture leggere afferenti al tipo A, ad esempio per le strutture in legno lamellare a strati incrociati (CLT), l'indice di riduzione delle vibrazioni K_{ij} può essere determinato dalle formule riportate in tabella.

Giunzione	Trasmissione	Valori di K_{ij} / dB	
a) Giunzione a T		Diritto	$K_{13} = 22$
		Angolo	$K_{23} = 15$
b) Giunzione a croce		Diritto	$K_{13} = 10 + 10 M$
		Diritto	$K_{24} = 23$
		Angolo	$K_{14} = 18$

Isolamento medio normalizzato di vibrazioni

Isolamento medio normalizzato di vibrazioni, $D_{v,ij,n}$ è una grandezza in decibel correlata alla potenza sonora trasmessa per vibrazione strutturale da un giunto tra due elementi costruttivi, come pareti e solai, normalizzata in modo da ottenere una quantità invariante e quindi una caratteristica intrinseca del giunto. L'indice si ottiene dalla differenza del livello di velocità di vibrazione mediata nei due sensi, in corrispondenza del giunto, e normalizzato alla lunghezza del giunto e alle superfici dei due elementi strutturali connessi al giunto.

$$D_{v,ij,n} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} + \left(10 \log \frac{l_{ij} l_0}{\sqrt{S_{m,i} S_{m,j}}} \right) \text{ dB},$$

dove:

$D_{v,ij}$ = isolamento di vibrazioni del giunto tra gli elementi i e j, quando l'elemento i è eccitato, in decibel;

$D_{v,ji}$ = isolamento di vibrazioni del giunto tra gli elementi j e i, quando l'elemento j è eccitato, in decibel;

l_{ij} = lunghezza del giunto tra gli elementi i e j, in metri;

$S_{m,i}$ = area dell'elemento i sul quale la velocità è mediata, in metri quadrati;

$S_{m,j}$ = area dell'elemento j sul quale la velocità è mediata, in metri quadrati;

l_0 = lunghezza di riferimento pari a 1 m.

Per edifici con strutture a telaio o, più in generale, con strutture afferenti ad elementi di tipo B, nel caso in cui la trasmissione laterale interessi tutta la struttura a telaio unico, $D_{v,ij,n}$ dipenderà dalle masse superficiali totali delle partizioni coinvolte nel giunto, come riportato nella tabella seguente.

Giunzione	Trasmissione	Valori di $D_{v,ij,n}$ dB	
Pareti leggere a doppio strato (elementi composti nella loro totalità)		Diritto	$\overline{D}_{v,13,n} = 15+15M$ (minimo 10 dB)
		Angolo	$\overline{D}_{v,12,n} = \overline{D}_{v,23,n} = 15+10M$

Il modello semplificato a singolo indice limita la sua applicazione ad un intervallo di frequenze da 100 Hz a 3150 Hz. Questo metodo consente, a partire dai vari elementi di edificio, di determinare l'indice di valutazione del potere fonoisolante apparente R_w' tra due ambienti secondo la seguente relazione:

$$R_w' = -10 \cdot \log \left(10^{-\frac{R_{Dd,w}}{10}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{-\frac{R_{Ff,w}}{10}} + \sum_{f=1}^n 10^{-\frac{R_{Df,w}}{10}} + \sum_{F=1}^n 10^{-\frac{R_{Fd,w}}{10}} + \frac{A_0}{S_S} \sum_{j=1}^m 10^{-\frac{D_{n,j,w}}{10}} \right) \text{ dB}, \quad (3.13)$$

dove:

$R_{Dd,w}$ = indice di valutazione del potere fonoisolante per la trasmissione diretta, in decibel;

$R_{Ff,w}$ = indice di valutazione del potere fonoisolante per il percorso di trasmissione F_f , in decibel;

$R_{Df,w}$ = indice di valutazione del potere fonoisolante per il percorso di trasmissione D_f , in decibel;

$R_{Fd,w}$ = indice di valutazione del potere fonoisolante per il percorso di trasmissione F_d , in decibel;

$D_{n,j,w}$ = indice di valutazione dell'isolamento acustico normalizzato equivalente per la trasmissione attraverso un piccolo elemento tecnico j ($D_{n,e}$) o un sistema di trasmissione per via aerea j ($D_{n,s}$) in decibel;

n = numero di elementi laterali in un ambiente, di solito n=4;

m = numero j di elementi o sistemi di trasmissione per via aerea;

S_S = area dell'elemento di separazione, in metri quadri;

A_0 = area di assorbimento di riferimento, in metri quadri, pari a 10 m².

Il potere fonoisolante $R_{Dd,w}$ è determinato dalla seguente relazione:

$$R_{Dd,w} = R_{s,w} + \Delta R_{Dd,w} \text{ dB}, \quad (3.14)$$

dove:

$R_{s,w}$ = indice di valutazione del potere fonoisolante dell'elemento di separazione, in decibel;

$\Delta R_{Dd,w}$ = incremento dell'indice di valutazione del potere fonoisolante mediante rivestimenti aggiuntivi sul lato emittente e/o ricevente dell'elemento di separazione, in decibel.

L'indice di valutazione del potere fonoisolante apparente $R_{ij,w}$ per trasmissione laterale, nel caso di strutture di tipo A, è determinato con la formula:

$$R_{ij,w} = \frac{R_{i,w}}{2} + \frac{R_{j,w}}{2} + \Delta R_{ij,w} + K_{ij} + 10 \cdot \log \frac{S_S}{l_0 \cdot l_{ij}} \text{ dB}, \quad (3.15)$$

dove:

i simboli i e j generalizzano i simboli (D), (d), (F), (f), usati nella relazione (2.11);

$R_{i,w}$ = indice di valutazione del potere fonoisolante della struttura i, in decibel;

$\Delta R_{j,w}$ = indice di valutazione del potere fonoisolante della struttura j, in decibel;

$\Delta R_{ij,w}$ = incremento dell'indice di valutazione del potere fonoisolante dovuto all'apposizione di strati aggiuntivi di rivestimento alle strutture omogenee i e j lungo il percorso ij, in decibel;

K_{ij} = indice di riduzione delle vibrazioni prodotto dal giunto ij, in decibel;

S_S = area della parete di separazione, in metri quadrati;

l_{ij} = lunghezza del giunto ij, in metri;

l_0 = lunghezza di riferimento pari a 1 m.

Per certe combinazioni di elementi leggeri ed elementi massicci, per esempio controsoffitti o facciate leggere, la trasmissione laterale è dominata dal percorso F_f per cui il terzo e quarto termine nella formula (3.13) possono essere trascurati per quell'elemento laterale.

Nel caso di strutture di tipo B, l'indice di valutazione del potere fonoisolante per trasmissione laterale, $R_{ij,w}$, per qualsiasi percorso F_f , D_f o F_d deve essere determinato dal corrispondente indice di valutazione dell'isolamento acustico normalizzato per trasmissione laterale, $D_{n,f,ij,w}$, mediante la formula:

$$R_{ij,w} = D_{n,f,ij,w} + \left(10 \log \frac{l_{ab}}{l_{ij}} \cdot \frac{S_S}{A_0} \right) \text{ dB}, \quad (3.16)$$

dove:

$D_{n,f,ij,w}$ = indice di valutazione dell'isolamento acustico normalizzato per trasmissione laterale, in decibel;

S_s = area della parete di separazione, in metri quadrati;

l_{ij} = lunghezza del giunto ij , in metri;

A_0 = area di assorbimento equivalente di riferimento, per le abitazioni = 10 m².

l_{lab} è solitamente uguale a 4,5 m per elementi orizzontali come i soffitti, e pari a 2,5 m per elementi laterali verticali come facciate.

L'indice di valutazione dell'isolamento acustico normalizzato per trasmissione laterale $D_{n,f,ij,w}$ può essere misurato o determinato dalle prestazioni dei singoli elementi come riportato nell'Appendice G della norma UNI EN ISO12354-1 o con la formula riportata di seguito:

$$D_{n,f,ij,w} = \frac{R_{i,w} + R_{j,w}}{2} + \Delta R_{ij,w} + \overline{D_{v,ij,n}} + 10 \log \left(\frac{S_0}{l_0 l_{ij}} \right) \text{ dB}, \quad (3.17)$$

dove:

i simboli i e j generalizzano i simboli (D), (d), (F), (f), usati nella relazione (2.11);

$R_{i,w}$ = indice di valutazione del potere fonoisolante della struttura i , in decibel;

$R_{j,w}$ = indice di valutazione del potere fonoisolante della struttura j , in decibel;

$\Delta R_{ij,w}$ = incremento dell'indice di valutazione del potere fonoisolante dovuto all'apposizione di strati addizionali di rivestimento alle strutture omogenee i e j lungo il percorso ij , in decibel;

($\overline{D_{v,ij,n}}$) = isolamento medio di vibrazione del giunto, in decibel;

S_0 = area di riferimento pari a 1 m²;

l_0 = lunghezza di riferimento pari a 1 m;

l_{ij} = lunghezza del giunto ij , in metri.

I valori di R_w possono essere ottenuti da calcolo oppure da misure in laboratorio effettuate secondo la norma UNI EN ISO 10140-3 [29].

Sulla base dell'indice R_w è possibile determinare l'indice $D_{nT,w}$ e l'indice $D_{n,w}$ mediante le seguenti formule:

$$D_{nT,w} = R_w + 10 \lg \frac{0,16V}{T_0 S_s} \text{ dB}, \quad (3.18)$$

$$D_{n,w} = R_w + 10 \lg \frac{A_0}{S_s} \text{ dB}, \quad (3.19)$$

dove il significato dei termini è stato già descritto nel testo.

In termini di accuratezza, i modelli di calcolo conducono a risultati più attendibili con elementi costruttivi di tipo omogeneo, come muri di mattoni, di calcestruzzo, blocchi di gesso, e registrano, per il modello dettagliato una deviazione tipo dei valori previsionali contenuta nell'intervallo 1,5-2,5 dB (il valore inferiore se si tiene conto di tutti gli aspetti, quello superiore in caso di situazioni complesse), e una deviazione tipo di 2 dB per il modello semplificato.

3.5 IL LIVELLO DEL RUMORE DI CALPESTIO

L'attitudine dei solai ad attenuare le sollecitazioni d'urto esercitate sulla loro superficie è espressa dal livello di rumore di calpestio L . Si tratta di una grandezza convenzionale che indica il livello di rumore presente in un locale quando sul solaio del locale sovrastante è in funzione la macchina generatrice

di calpestio normalizzata, con caratteristiche meccaniche ben definite (forma e massa dei martelli, altezza di caduta, ritmo di percussione).

La norma UNI EN ISO 16283-2 [30] definisce il *Livello di pressione sonora da calpestio*, L_i , espresso in decibel, come il livello medio di pressione sonora misurato in terzi di ottava nell'ambiente ricevente, quando il solaio è sollecitato da un generatore di calpestio normalizzato. Esso è determinato con la formula:

$$L_i = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{L_j/10} \right) \text{ dB}, \quad (3.20)$$

dove L_j sono i livelli di pressione sonora misurati in n posizioni diverse nell'ambiente ricevente.

La Figura 3. 11 mostra uno schema di esecuzione della misurazione mediante l'utilizzo della macchina generatrice di calpestio normalizzata.

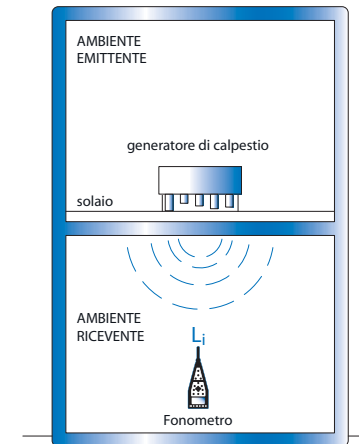


Figura 3. 12 - Schema della misurazione del livello di pressione sonora di calpestio secondo la norma UNI 16283-2 (tratto da [21]).

Dal livello L_i si ottiene il *Livello di rumore di calpestio normalizzato rispetto all'assorbimento acustico equivalente*, L'_n , secondo la relazione:

$$L'_n = L_i + 10 \log \frac{A}{A_0} \text{ dB}, \quad (3.21)$$

dove:

A = area di assorbimento acustico equivalente dell'ambiente ricevente, in metri quadrati;

A_0 = area di assorbimento acustico equivalente di riferimento, in metri quadrati; per abitazioni la norma indica 10 m²;

e il Livello di rumore di calpestio normalizzato rispetto al tempo di riverberazione, L'_{nT} , secondo la relazione:

$$L'_{nT} = L_i - 10 \log \frac{T}{T_0} \text{ dB}, \quad (3.22)$$

dove:

T = tempo di riverberazione dell'ambiente ricevente, in secondi;

T_0 = tempo di riverberazione di riferimento, in secondi; per ambienti assimilabili ad abitazioni la norma indica 0,5 s.

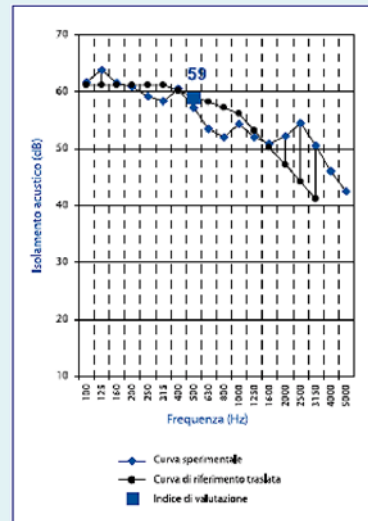
Anche in questo caso l'apostrofo indica una grandezza di tipo 'apparente', che tiene conto dei percorsi di trasmissione laterale.

L'indice unico, $L'_{n,w}$ o $L'_{nT,w}$, si ottiene dai valori del livello di pressione sonora di calpestio L'_n o L'_{nT} in bande di un terzo di ottava, secondo il metodo descritto nella norma UNI EN ISO 717-2 [31].

Indice di valutazione dell'isolamento del rumore di calpestio

Le misurazioni dei requisiti acustici passivi, in opera e in laboratorio, vengono generalmente eseguite in funzione della frequenza in bande di un terzo di ottava. La necessità di esprimere in modo sintetico tali requisiti ha condotto alla definizione di un metodo per la determinazione di un unico parametro, denominato indice di valutazione, a partire dai valori in frequenza. La norma UNI EN ISO 717-2 descrive il metodo per la determinazione dell'indice di valutazione delle grandezze riferite all'isolamento del rumore di calpestio

($L_{n,w}$, $L'_{n,w}$, $L'_{nT,w}$), riportando le curve di riferimento per il calcolo dell'indice a partire dai risultati sperimentali (o di calcolo) in bande di ottava o terzi di ottava.



¹ $L_{n,w}$ rappresenta l'indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato, ottenuto da misure in laboratorio secondo la norma UNI EN ISO 10140-3 [29].

La procedura prevede di far scorrere la curva di riferimento per passi di 1 dB rispetto alla curva sperimentale di $L_{n,w}$, $L'_{n,w}$, $L'_{nT,w}$, fino a quando la somma degli scarti sfavorevoli (si hanno quando il risultato sperimentale è superiore al valore di riferimento), diventa più grande possibile, ma non superiore a 32 dB, per misurazioni effettuate in 16 bande di un terzo d'ottava, o a 10 dB, per misurazioni effettuate in 5 bande di ottava. Quando si verifica questa condizione il valore dell'indice di valutazione si legge sulla curva di riferimento in corrispondenza della frequenza di 500 Hz.

NB: Le misurazioni in bande di ottava sono previste solo per $L'_{n,w}$ e $L'_{nT,w}$, e in questo caso l'indice di valutazione ottenuto secondo il metodo specificato deve essere ridotto di 5 dB.

L'attenuazione del rumore di calpestio si può conseguire realizzando un pavimento galleggiante o rivestendo il solaio con un pavimento resiliente come le pavimentazioni in gomma o in moquettes, anche direttamente applicata sul solaio.

Le prestazioni dei sottofondi elastici per pavimenti galleggianti e dei pavimenti resilienti sono espresse in termini di "Attenuazione di livello di pressione sonora di calpestio", ΔL . Le misure vengono effettuate in laboratorio secondo la norma UNI EN ISO 10140-3 [29].

Questa grandezza rappresenta, per ogni banda di frequenza considerata, la riduzione del livello di pressione sonora di calpestio conseguente alla posa del rivestimento per pavimentazione, secondo relazione:

$$\Delta L = L_{n0} - L_n \text{ dB}, \quad (3.23)$$

dove:

L_{n0} = livello di pressione sonora di calpestio normalizzato rispetto all'assorbimento acustico del solaio normalizzato senza il rivestimento di pavimentazione, in decibel;

L_n = livello di pressione sonora di calpestio normalizzato del solaio normalizzato rispetto all'assorbimento acustico con il rivestimento di pavimentazione, in decibel.

Nel caso di rivestimento per pavimentazione costituito da un pacchetto galleggiante è prevista la posa di un massetto tradizionale pari a 5 cm di spessore, in assenza di pavimentazione.

L'indice di valutazione dell'attenuazione di livello di pressione sonora di calpestio, ΔL_w , si ottiene riportando i valori misurati di ΔL ad un solaio di riferimento come descritto nella norma UNI EN ISO 717-2.

Il valore limite dell'indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato fra ambienti sovrapposti, $L'_{n,w}$, siano essi appartenenti a diverse unità immobiliari o della stessa unità immobiliare, è pari a 53 dB secondo la UNI 11367 recepita dal DM dell'11 ottobre 2017 in tema di Criteri Ambientali Minimi (CAM). Il D.P.C.M. 5/12/97 stabilisce invece che il valore massimo ammissibile dell'indice $L'_{n,w}$ nel caso di ambienti sovrapposti sia pari a 58 dB. La Tabella 3. 13 riassume i valori massimi dell'indice $L'_{n,w}$ indicati dai due riferimenti normativi.

Riferimento normativo	Indice di valutazione	Valore di riferimento (dB)
UNI 11367	L'_{nw}	≤ 53
D.P.C.M. 5/12/97	L'_{nw}	≤ 58

Tabella 3. 12 - Valore minimo dell'indice di livello di pressione sonora di calpestio normalizzato fra ambienti L'_{nw} negli edifici scolastici.

La Norma UNI EN ISO 12354-2 [32] riporta i modelli di calcolo dettagliato, per bande di frequenza, e semplificato, a singolo indice, per valutare l'isolamento acustico al calpestio fra ambienti sovrapposti e fra ambienti adiacenti, basandosi su dati di trasmissione diretta e laterale attraverso gli elementi di edificio interessati.

Il modello di calcolo dettagliato porta alla determinazione dei livelli di pressione sonora di calpestio per bande di frequenza, a partire dai quali è possibile ottenere l'indice di valutazione in conformità alla UNI EN ISO 717-2. Il modello semplificato porta alla determinazione diretta dell'indice di valutazione a partire dagli indici di valutazione delle grandezze coinvolte nei calcoli.

I principi generali di calcolo si basano sull'assunzione che la potenza irradiata nell'ambiente ricevente sia dovuta al suono irradiato da ogni elemento strutturale dell'ambiente stesso, dovuto al calpestio sull'estradosso del solaio o della parete laterale nell'ambiente emittente. Si suppone che la trasmissione per ciascuna via sia indipendente e che l'energia totale possa essere calcolata sommando l'energia trasmessa attraverso ciascuna via.

In Figura 3. 12 sono illustrate le diverse vie di trasmissione sonora di calpestio per ambienti sovrapposti (a) ed adiacenti (b): nel primo caso sono indicate la trasmissione diretta d e le quattro vie di trasmissione ij , nel secondo caso sono indicate le due vie di trasmissione ij ; in entrambi i casi i individua il solaio su cui agisce il rumore impattivo e j individua una delle pareti dell'ambiente ricevente.

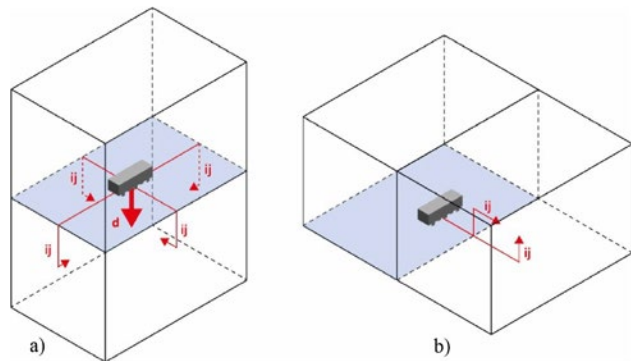


Figura 3. 13 - Percorsi di trasmissione sonora diretta e laterale ij fra ambienti sovrapposti ed adiacenti.

Di seguito si riporta il modello semplificato a singolo indice. Questo metodo consente di determinare l'indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato rispetto all'assorbimento acustico, $L'_{n,w}$, fra ambienti sovrapposti a partire dai vari elementi di edificio, mediante la relazione:

$$L'_{n,w} = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{L_{n,d,w}}{10}} + \sum_{j=1}^n 10^{\frac{L_{n,ij,w}}{10}} \right) \text{ dB}, \quad (3.24)$$

dove:

$L_{n,d,w}$ = livello di pressione sonora di calpestio normalizzato rispetto all'assorbimento acustico ponderato dovuto alla trasmissione diretta di calpestio, in decibel;

$L_{n,ij,w}$ = indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato rispetto all'assorbimento acustico ponderato dovuto alla trasmissione laterale, in decibel;

n = numero degli elementi.

Per ambienti adiacenti, il livello di pressione sonora di calpestio totale, L'_{nw} nell'ambiente ricevente è determinato mediante la seguente relazione:

$$L'_{n,w} = 10 \cdot \log \sum_{j=1}^n 10^{\frac{L_{n,ij,w}}{10}} \text{ dB}, \quad (3.25)$$

Il livello di pressione sonora di calpestio normalizzato rispetto all'assorbimento acustico per il percorso diretto è determinato dalla relazione:

$$L'_{n,d,w} = L_{n,eq,0,w} - \Delta L_w - \Delta L_{d,w} \text{ dB}, \quad (3.26)$$

dove:

$L_{n,eq,0,w}$ = indice di valutazione livello di pressione sonora di calpestio normalizzato rispetto all'assorbimento acustico equivalente del solo pavimento;

ΔL_w = indice di valutazione dell'attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio di un rivestimento di pavimentazione;

$\Delta L_{d,w}$ = indice di valutazione dell'attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio di uno strato ulteriore sul lato ricevente dell'elemento divisorio.

Si specifica che l'indice $\Delta L_{d,w}$ è una grandezza raramente disponibile e spesso approssimata dall'incremento del potere fonoisolante $\Delta R_{d,w}$.

Come per il calcolo della trasmissione laterale dell'indice di valutazione del potere fonoisolante apparente il metodo di calcolo dipende dalla tipologia delle strutture che possono essere di tipo A o B. Nel caso di strutture di tipo A, per determinare $L_{n,w}$ occorre preventivamente calcolare l'indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato per trasmissione laterale, $L_{n,ij,w}$, di ogni singolo percorso di trasmissione sonora; ciò può essere fatto mediante la formula:

$$L_{n,ij,w} = L_{n,eq,0,w} - \Delta L_w + \frac{R_{i,w} + R_{j,w}}{2} - \Delta R_{j,w} - K_{ij} - 10 \cdot \log \frac{S_i}{l_{ij}} \text{ dB}, \quad (3.27)$$

dove:

$L_{n,ij,w}$ = indice di valutazione livello di pressione sonora di calpestio normalizzato per trasmissione laterale generato sul pavimento i e irradiato dall'elemento j ;

$L_{n,eq,0,w}$ = indice di valutazione livello di pressione sonora di calpestio normalizzato rispetto all'assorbimento acustico equivalente del solo pavimento;

ΔL_w = indice di valutazione dell'attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio di un rivestimento di pavimentazione;

S_i = area dell'elemento i, in metri quadri;

$R_{i,w}$ = indice di valutazione del potere fonoisolante dell'elemento i;

$R_{j,w}$ = indice di valutazione del potere fonoisolante dell'elemento j;

K_{ij} = indice di riduzione delle vibrazioni per il percorso ij (vedi paragrafo 3.4);

$\Delta R_{j,w}$ = incremento dell'indice di valutazione del potere fonoisolante di uno strato ulteriore sul lato ricevente dell'elemento laterale j.

Per le strutture di tipo B, l'indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato per trasmissione laterale, $L_{n,ij,w}$, di ogni singolo percorso di trasmissione sonora, può essere determinato mediante la formula:

$$L_{n,ij,w} = L_{n,eq,0,w} - \Delta L_w + \frac{R_{i,w} - R_{j,w}}{2} + \Delta R_{ij,w} + \overline{D_{v,ij,n}} + 10 \log \left(\frac{S_i}{l_0 l_{ij}} \right) \text{ dB}, \quad (3.28)$$

dove:

$L_{n,ij,w}$ = indice di valutazione livello di pressione sonora di calpestio normalizzato per trasmissione laterale generato sul pavimento i e irradiato dall'elemento j;

$L_{n,eq,0,w}$ = indice di valutazione livello di pressione sonora di calpestio normalizzato rispetto all'assorbimento acustico equivalente del solo pavimento;

ΔL_w = indice di valutazione dell'attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio di un rivestimento di pavimentazione;

$R_{i,w}$ = indice di valutazione del potere fonoisolante dell'elemento i;

$R_{j,w}$ = indice di valutazione del potere fonoisolante dell'elemento j;

K_{ij} = indice di riduzione delle vibrazioni per il percorso ij (vedi paragrafo 3.4);

$\Delta R_{j,w}$ = incremento dell'indice di valutazione del potere fonoisolante di uno strato ulteriore sul lato ricevente dell'elemento laterale j.

$(\overline{D_{v,ij,n}})$ = isolamento medio di vibrazione del giunto, in decibel;

S_i = area dell'elemento i, in metri quadri;

l_0 = lunghezza di riferimento pari a 1 m.

l_{ij} = lunghezza del giunto ij, in metri;

La UNI 12354-2 indica le relazioni (3.27) e (3.28) per il calcolo dell'indice $L_{n,eq,0,w}$ rispettivamente per pavimenti omogenei (pavimenti di calcestruzzo pieno gettati in opera, pavimenti di calcestruzzo cellulare autoclavato e pavimenti di lastroni o travetti in calcestruzzo) e per pavimenti parzialmente omogenei (pavimenti costituiti da travetti e blocchi di argilla prefabbricati).

$$L_{n,eq,0,w} = 164 - \left[35 \log \frac{m'}{(1 \text{ kg/m}^2)} \right] \text{ dB}, \quad (3.29)$$

$$L_{n,eq,0,w} = 160 - \left[35 \log \frac{m'}{(1 \text{ kg/m}^2)} \right] \text{ dB}, \quad (3.30)$$

Per solai in CLT (con $70 \text{ kg/m}^2 \leq m' \leq 130 \text{ kg/m}^2$) l'indice di valutazione del rumore di calpestio, in mancanza di dati di laboratorio, può essere ricavato in funzione della massa superficiale del pannello mediante la formula:

$$L_{n,eq,0,w} = 160 - 22 \log (m') \text{ dB}, \quad (3.31)$$

Per altre tipologie di solai non omogenei realizzati senza la presenza di uno strato di massetto allgerito la norma UNI EN 15037-3 [33] fornisce la seguente formula:

$$L_{n,eq,0,w} = 170 - \left[35 \log \frac{m'}{(1 \text{ kg/m}^2)} \right] \text{ dB}, \quad (3.32)$$

Il testo normativo della norma UNI 12354-2 [33] indica, inoltre, le formule da utilizzare per il calcolo dell'indice di valutazione dell'attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio, ΔL_w , che dipende dalla massa per unità di area m' del pavimento galleggiante e dalla rigidità dinamica per unità di area s' , dello strato resiliente e che può essere utilizzato solo se il massetto galleggiante è posato su solai in calcestruzzo armato o laterocemento:

per pavimenti galleggianti in cemento sabbioso o solfato di calcio, i valori possono essere calcolati utilizzando la formula:

$$\Delta L_w = [13 \log (m')] - [14,2 \log (s')] + 20,8 \text{ dB}, \quad (3.33)$$

per pavimenti galleggianti a secco o in asfalto, i valori possono essere calcolati utilizzando la formula:

$$\Delta L_w = (-0,21 m' - 5,45) \log (s') + 0,46 m' + 23,8 \text{ dB}, \quad (3.34)$$

La rigidità dinamica

La misura della rigidità dinamica è riportata dalla norma UNI EN 29052-1 [34], "Acustica. Determinazione della rigidità dinamica. Materiali utilizzati sotto i pavimenti galleggianti negli edifici residenziali" [25], nella quale è definita la rigidità dinamica per unità di superficie, s' , come il rapporto tra la forza dinamica, F , in Meganewton, applicata su un provino di materiale di superficie S , misurato in metri quadrati, e lo spostamento dinamico Δd , in metri, secondo la formula:

$$s' = \frac{F}{S} \cdot \frac{1}{\Delta d} \cdot \text{MN/m}^3$$

La rigidità dinamica, nel caso siano presenti due o più strati resilienti che ricoprono interamente e senza interruzioni la superficie del pavimento, è calcolata utilizzando la formula:

$$s'_{\text{tot}} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{s'_i} \right)^{-1} \text{ MN/m}^3$$

dove s'_i è la rigidità dinamica per unità di area dello strato resiliente i .

In termini di accuratezza, i modelli conducono a risultati più attendibili con elementi costruttivi di tipo omogeneo, come muri di mattoni, pareti e pavimenti in calcestruzzo, blocchi di gesso, e registrano, per la trasmissione verticale dei rumori da calpestio una deviazione tipo di 2 dB e a una deviazione tipo di 3 dB per la trasmissione orizzontale.

3.6 GLI INDICI DI INTELLIGIBILITÀ

La valutazione della qualità acustica delle aule scolastiche è principalmente basata sulla verifica delle prestazioni dell'ambiente in termini di intelligibilità del parlato. Per intelligibilità del parlato si intende la percentuale di parole o frasi correttamente comprese da un ascoltatore rispetto alla totalità delle frasi pronunciate da un parlatore. Essa dipende, oltre che dal rumore e dalla riverberazione, dalle caratteristiche di emissione della voce umana, in particolare dall'intensità di emissione, variabile secondo lo sforzo vocale del parlatore, dalla direzionalità della sorgente parlatore e da altri fattori tra i quali quelli di natura linguistica, ossia la struttura grammaticale della lingua, e semantica, ossia il senso generale del messaggio.

Esistono vari metodi per valutare l'intelligibilità del parlato in un ambiente. La metodologia di riferimento, di tipo soggettivo, consiste nella realizzazione di test d'intelligibilità tra parlatori e gruppi di ascoltatori usando frasi o parole in rima. Si tratta di una procedura estremamente laboriosa che richiede tempi lunghi per essere attuata; è dunque auspicabile poter disporre di tecniche alternative che permettano di stimare l'intelligibilità tramite indici fondati su parametri oggettivi facilmente misurabili.

La norma UNI EN ISO 9921 [35] è il principale riferimento per la determinazione della qualità della comunicazione verbale riferita a diverse condizioni di ascolto. I messaggi verbali presi in considerazione variano dagli allarmi verbali, ai segnali di pericolo, ai messaggi di informazione e alle comunicazioni verbali in generale. La norma considera la comunicazione diretta persona-persona, senza l'utilizzo di dispositivi elettroacustici, la comunicazione pubblica, in generale indirizzata ad un gruppo di persone in uno o più ambienti utilizzando un sistema elettroacustico, i sistemi di comunicazione personale, che includono l'utilizzo di telefoni, telefoni mobili, citofoni, e telefoni ad auricolare senza fili.

La valutazione della qualità della comunicazione verbale include l'intelligibilità del parlato, per la quale la norma definisce diversi metodi oggettivi di previsione, tra i quali il SIL (*Speech Interference Level*), la Chiarezza C50, e lo STI (*Speech Transmission Index*).

3.6.1 Speech Interference Level (SIL)

Il livello di interferenza sul parlato SIL (*Speech Interference Level*) si utilizza per valutare l'intelligibilità in ambienti generalmente piccoli, dove la riverberazione risulta trascurabile. Il SIL è definito come differenza fra il livello del segnale e quello del rumore rilevati nella posizione dell'ascoltatore, prendendo in considerazione il rumore emesso nelle bande di ottava tra le frequenze 500 e 4000 Hz. Il SIL fa riferimento alla valutazione dell'intelligibilità per comunicazione diretta, in ambienti o condizioni nelle quali è possibile trascurare la riverberazione come fattore influenzante, ovvero dove il tempo di riverberazione assume valori molto contenuti. Sviluppato da Beranek alla fine degli anni quaranta per valutare la comprensibilità della parola all'interno delle cabine degli aerei, è stato modificato nel tempo fino ad assumere la versione attuale recepita dalla normativa ISO. La formula che permette di ottenere questo parametro è la seguente:

$$SIL = L_{S,A} - L_{SIL} \quad (3.35)$$

dove:

$L_{S,A}$ = livello ponderato A del parlato alle orecchie dell'ascoltatore, in decibel;

L_{SIL} = livello di interferenza sul parlato del rumore alle orecchie dell'ascoltatore, ottenuto come media aritmetica dei livelli di pressione sonora del rumore di fondo nelle quattro bande di ottava tra 500 Hz e 4000 Hz, in decibel.

Il livello di pressione sonora del parlato nella posizione dell'ascoltatore è calcolato con la formula:

$$L_{S,A} = L_{S,A,1m} - 20 \log \frac{r}{r_0} \quad (3.36)$$

dove:

$L_{S,A,1m}$ = livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata A alla distanza di 1 m di fronte alla bocca del parlatore, definito "sforzo vocale", in decibel A;

r = distanza tra parlatore e ascoltatore, in metri.

Nella Tabella 1.1 del paragrafo 1.2 sono riportati gli sforzi vocali per un parlatore di sesso maschile e i relativi livelli di pressione sonora ponderati A ad 1 m di fronte alla bocca [35].

L'indice SIL è stato correlato a scale soggettive di intelligibilità, come quella riportata in Tabella 3. 13. L'indice SIL è stato correlato a scale soggettive di qualità della comunicazione come quella riportata in Tabella 3. 13 e mostra la corrispondenza tra il SIL e la relativa fascia di valutazione della comprensione del parlato in accordo alla UNI EN ISO 9921.

Grado di intelligibilità	SIL (dB)
Eccellente	> 21
Buono	da 15 a 21
Discreto	da 10 a 15
Scadente	da 3 a 10
Pessimo	< 3

Tabella 3. 13 - Corrispondenza tra gradi di intelligibilità e valori degli indici oggettivi SIL.

3.6.2 Chiarezza C50

La Chiarezza C_{50} si utilizza per valutare l'intelligibilità in ambienti non rumorosi. In accordo alla UNI EN ISO 3382-1 [36], la C_{50} è definita come il rapporto tra l'energia sonora che giunge all'ascoltatore nei primi 50 ms e l'energia che giunge all'ascoltatore da 50 ms alla fine del decadimento del segnale. L'indice C_{50} venne definito da Reimer e Muller ed è determinato mediante la formula seguente:

$$C_{50} = 10 \cdot \log \frac{\int_0^{50ms} p^2(\tau) d\tau}{\int_{50ms}^{\infty} p^2(\tau) d\tau} \quad (3.37)$$

dove p(t) è la pressione sonora, intesa come risposta all'impulso emesso da una sorgente (con t=0 corrispondente all'istante in cui il suono diretto giunge nel punto di ricezione).

Nel rapporto che compare nella definizione dell'indice di chiarezza a numeratore vi è l'energia utile che giunge all'ascoltatore entro i primi 50 ms e a denominatore l'energia dannosa che perviene negli istanti successivi.

La percezione di chiarezza è legata alla facoltà del cervello umano di combinare il suono diretto con le prime riflessioni in modo tale da permettere una precisa distinzione delle sillabe o delle note: in particolare, le riflessioni che arrivano entro 50 ms per il parlato vengono integrate dal cervello e contribuiscono a rinforzare l'intensità del suono e al miglioramento della percezione (effetto di precedenza o Haas). Le successive riflessioni in genere sono percepite come distinte e fastidiose e contribuiscono alla sensazione di eco.

I metodi previsionali per il calcolo di C_{50} sono indicati dalla norma UNI11532-1[37] e si distinguono in: calcolo approssimativo, in funzione del tempo di riverberazione T , con la formula (3.34):

$$C_{50} = 10 \log \left[\exp \left(\frac{0,691}{T} \right) - 1 \right] \text{ dB}, \quad (3.38)$$

oppure: calcolo puntuale, in funzione del volume dell'ambiente, V in metri cubi, del tempo di riverberazione, T in secondi, e della distanza sorgente-ricevitore, r in metri, secondo la teoria di Barron & Lee [38], con la formula (3.36), in decibel:

$$C_{50}(r) = 10 \log \frac{100}{r^2} + \left(\frac{31200T}{V} \right) \left(1 - e^{-\frac{0,691}{T}} \right) e^{-\frac{0,04r}{T}}}{e^{-\frac{0,04r}{T}} \left(\frac{31200T}{V} \right) \left(e^{-\frac{0,691}{T}} \right)} \text{ dB}, \quad (3.39)$$

Nello specifico degli ambienti scolastici, la UNI 11532-2 stabilisce che il descrittore C_{50} può essere applicato soltanto alle categorie A1, A2, A3, A4 in alternativa allo *Speech Transmission Index* (STI), esclusivamente per ambienti di dimensioni inferiori ai 250 m³ e ne fornisce il valore di riferimento riferito ad ambienti arredati e non occupati (con la presenza di due persone al massimo), senza impianto di amplificazione o con impianto spento (Tabella 3. 14).

Descrittore	Condizione	V < 250 m ³
C50	Senza impianto di amplificazione o con impianto spento	≥ 2 dB

Tabella 3. 14 – Valore di riferimento del descrittore C50

Il risultato del calcolo previsionale o della misura di collaudo, da confrontare con il valore di riferimento, è dato dalla media aritmetica spaziale dei valori di Chiarezza nel range di frequenza da 500 Hz a 2000 Hz, per ciascuna delle posizioni indicate in Figura 3. 6. Nel caso della verifica, il confronto con il valore di riferimento deve essere corretto con l'incertezza di misura.

3.6.3 Speech Transmission Index (STI)

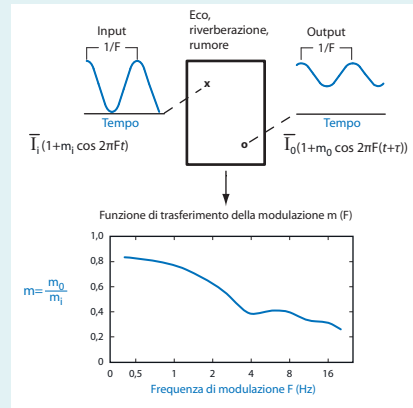
Di più generale applicazione, lo STI (*Speech Transmission Index*), quantifica l'effetto combinato dell'interferenza del rumore di fondo e della riverberazione sulla riduzione di intelligibilità del parlato con e senza sistemi di amplificazione sonora. Si ottiene secondo una procedura con la quale si determina la funzione di trasferimento della modulazione, che quantifica la riduzione dell'indice di modulazione di un segnale di test che riflette le caratteristiche del parlato continuo, dalla sua emissione alla sua ricezione.

L'indice si basa sulla determinazione di 98 valori di fattore di riduzione della modulazione, per ognuna delle 7 bande di ottava da 125 Hz a 8 kHz, modulate con 14 frequenze di modulazione ad intervalli di un terzo di ottava da 0,63 Hz fino a 12,5 Hz.

Lo STI fornisce la base per la valutazione e per la scelta relativa alle caratteristiche dell'impianto di diffusione sonora. Aspetti come la direttività, la potenza e il posizionamento dei diffusori possono risultare estremamente critici in ambiente acusticamente carenti per gli aspetti sopra indicati.

Funzione di trasferimento della modulazione

La funzione di trasferimento della modulazione (Modulation Transfer Function, MTF) quantifica la riduzione dell'indice di modulazione di un segnale di test, in funzione della frequenza di modulazione. Per ciascuna frequenza di modulazione la MTF è determinata dal rapporto tra l'indice di modulazione del segnale in corrispondenza dell'ascoltatore, m_0 , e l'indice di modulazione del segnale di test, m_i .



Viene determinata una famiglia di curve della MTF, nella quale ogni curva è relativa a ciascuna banda di 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'involuppo dei segnali naturali del parlato. Nel caso di misura dell'indice STI, sono considerate 7 bande di ottava, da 125 Hz a 8 kHz, e 14 frequenze di modulazione, comprese tra 0,63 e 12,5 Hz, in intervalli di un terzo d'ottava. I 98 (7*14) valori di m vengono infine sintetizzati in un unico indice, lo STI, variabile fra 0 e 1, che rappresenta l'effetto del sistema di trasmissione sull'intelligibilità [40].

La parte 1 della norma UNI 11532 descrive il metodo di misura diretto, più oneroso perché basato su segnali modulati in intensità, e il metodo di misura indiretto applicabile nel caso di sistemi di trasmissione lineari e tempo invarianti. In questo secondo caso si prevede la misurazione della risposta all'impulso relativa al percorso di trasmissione in assenza di rumore, e del rapporto segnale/rumore nella posizione dell'ascoltatore. I 98 valori di fattore di riduzione della profondità di modulazione $m_{f,F}$, alla frequenza di modulazione F nella banda di ottava f, si ottengono dalla seguente relazione:

$$m_{f,F} = \frac{\left| \int_0^{\infty} e^{j2\pi Ft} p_f^2(t) dt \right|}{\int_0^{\infty} p_f^2(t) dt} \cdot \frac{1}{(1+10^{-(S/N)_f/10})} \quad (3.40)$$

dove:

$p_f(t)$ è la risposta all'impulso per il percorso sorgente ricevitore nella banda di ottava f;
 S/N_f , è il rapporto segnale/rumore, cioè la differenza fra il livello del segnale (livello del parlato) e quello del rumore nella posizione dell'ascoltatore, per la banda di ottava considerata, in decibel (dB).

I procedimenti di calcolo prevedono da un lato il metodo della risposta all'impulso simulata mediante l'ausilio di software specifici oppure il calcolo dei 98 valori di fattore di riduzione della profondità di modulazione $m_{f,F}$, con l'espressione (3.38), assumendo l'ipotesi di un campo riverberato diffuso con contributo del suono diretto trascurabile [39], come nel caso di ricevitori molto distanti dalla sorgente, ad una distanza superiore ad almeno 5 volte la distanza critica:

$$m_{f,F} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi F X T_f}{13,8}\right)^2}} \cdot \frac{1}{(1+10^{-(L_{sr,f}-L_{n,f})/10})} \quad (3.41)$$

dove:

T_f è il tempo di riverberazione nella banda di ottava f, in s;
 $L_{sr,f}$ è il livello del parlato nel campo riverberato nella banda di ottava f, in decibel (dB);
 $L_{n,f}$ è il livello del rumore nella banda di ottava f, in decibel (dB),

Il livello del parlato nel campo riverberato può essere calcolato dalla relazione:

$$L_{sr,f} = L_{s,1m,f} - ID_f - 10 \cdot \log r_{c,f}^2 \quad (3.42)$$

dove:

$L_{s,1m,f}$ è il livello del parlato ad 1 m dalla bocca del parlatore in campo libero nella banda di ottava f, in decibel (dB);
 ID_f è l'indice di direttività, in decibel (dB), ottenuto dalla seguente relazione:

$$ID_f = 10 \log Q_f \quad (3.43)$$

dove:

Q_f , è il fattore di direttività nella banda di ottava considerata. Sull'asse di massima emissione, in corrispondenza degli angoli azimutale e di elevazione di 0°, si può assumere un indice di direttività ID_f variabile da 1 a 3 dB per valori di frequenza minori o uguali a 1 kHz, e da 2 dB a 5 dB per valori superiori; $r_{c,f}$ è la distanza critica, in metri, nella banda di ottava f considerata.

La norma prevede anche un metodo di calcolo che considera l'ipotesi di campo riverberante diffuso e l'apporto del suono diretto nella posizione dell'ascoltatore, da applicarsi nel caso di ricevitori più prossimi alla sorgente sonora.

Distanza critica

Si definisce *distanza critica*, la distanza per la quale il livello di pressione del campo diretto eguaglia quello del campo riverberato. Essa si ottiene con la formula:

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

con V area di assorbimento acustico equivalente, in metri cubi e T_f il tempo di riverberazione della frequenza considerata.

In Tabella 1.1 sono riportati i livelli di pressione sonora ponderati A, ad 1 m di fronte alla bocca di un parlatore, $L_{s,A,1m}$, e i corrispondenti sforzi vocali.

Lo spettro del parlato si ottiene dalla Tabella 3. 15 per il genere maschile e femminile, dove i livelli nelle bande di ottava, $L_{s,f,1m}$, 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

Tabella 3. 15 - Livelli di pressione sonora del parlato in bande di ottava, ad 1 m dalla bocca del parlatore, $L_{s,f,1m}$, relativi al livello globale ponderato A, $L_{s,A,1m}$.

Ciascuno dei 98 valori, corretto per tenere conto degli effetti di mascheramento uditivo e della soglia assoluta di udibilità, viene convertito in rapporto segnale/rumore effettivo, $(S/N)_{eff}$ ovvero un rapporto segnale/rumore equivalente che in assenza di riverberazione, fornirebbe lo stesso valore di m, calcolato come segue:

$$(S/N)_{eff,f,F} = 10 \log \left(\frac{m_{f,F}}{1-m_{f,F}} \right) \quad (3.44)$$

Ogni rapporto segnale rumore/rumore viene limitato all'intervallo compreso tra -15 dB e +15 dB e convertito in indice di trasmissione del parlato ($TI_{f,F}$), compreso in un intervallo tra 0 e 1, attraverso la seguente relazione:

$$TI_{f,F} = \frac{(S/N)_{eff,f,F} + 15}{30} \quad (3.45)$$

Dalla somma ponderata degli indici di trasferimento della modulazione (MTI_f), calcolati come media aritmetica degli indici di trasmissione per le 14 frequenze di modulazione per ciascuna banda di ottava con la formula (3.43), si ottiene l'indice STI, che varia da 0 a 1, basato sui contributi pesati relativi alle 7 bande di ottava in accordo alla relazione (3.44):

$$MTI_f = \frac{1}{14} \sum_{F=1}^{14} T_{f,F} \quad (3.46)$$

$$STI = \sum_{f=1}^7 \alpha_f \times MTI_f - \sum_{f=1}^6 \beta_f \times \sqrt{MTI_f \times MTI_{f+1}} \quad (3.47)$$

α_f e β_f restituiti in Tabella 3. 16 sono rispettivamente il fattore di pesatura per la banda f e il fattore di ridondanza tra la banda f e la banda f+1, utilizzati per la determinazione dell'indice STI nei casi di voce maschile e femminile. Il parlato maschile è generalmente più usato in quanto meno intelligibile del parlato femminile.

Sesso del parlatore		Frequenza centrale delle bande di ottava (Hz)						
		125	250	500	1000	2000	4000	8000
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	-

Tabella 3. 16 - Fattori di pesatura α_f e di ridondanza β_f per la determinazione dell'indice STI nei casi di voce maschile e femminile.

L'indice STI, variabile fra 0 e 1, è stato correlato a scale soggettive di intelligibilità, come quella riportata in Tabella 3. 17 che mostra la corrispondenza tra l'indice STI e la relativa fascia di valutazione della comprensione del parlato in accordo alla UNI EN ISO 9921.

Grado di intelligibilità	STI
Eccellente	$0 < STI \leq 0,3$
Buono	$0,3 < STI \leq 0,45$
Discreto	$0,45 < STI \leq 0,6$
Scadente	$0,6 < STI \leq 0,75$
Pessimo	$0,75 < STI \leq 1$

Tabella 3. 17 - Corrispondenza tra gradi di intelligibilità e valori degli indici oggettivi STI.

La 11532-2 stabilisce i valori di riferimento, recepiti dal DM dell'11 ottobre 2017 in tema di Criteri Ambientali Minimi (CAM) per il settore scolastico riferiti a un ambiente arredato e non occupato, nel caso di assenza o presenza di impianto di amplificazione in ambiente, come indicato in Tabella 3. 18.

Descrittore	Condizione	V < 250 m ³	Volume ≥ 250 m ³
STI	Senza impianto di amplificazione o con impianto spento	≥ 0,55 con segnale di emissione a 1 m in asse alla sorgente pari a 60 dB(A)	≥ 0,50 con segnale di emissione a 1 m in asse alla sorgente pari a 70 dB(A)
	Con impianto di amplificazione	≥ 0,60 con segnale di emissione come in normali condizioni d'uso dell'impianto di amplificazione	

Tabella 3. 18 – Valori di riferimento del descrittore STI

Il risultato del calcolo previsionale, da confrontare con il valore di riferimento, è dato dalla media aritmetica spaziale dei valori nelle posizioni indicate in Figura 3. 6. Per la verifica, i valori misurati prima di essere confrontati con i valori di riferimento, devono essere corretti con l'incertezza di misura.

Gli intervalli di accettabilità indicati in Tabella 3. 18 sono stati determinati per le persone adulte. Per i bambini, soprattutto dei primi anni di scuola elementare, sono invece pochi gli studi finalizzati a valutare le correlazioni fra intelligibilità e indici oggettivi, molti dei quali realizzati in laboratorio, in condizioni di ascolto monoaurale. Tra le indagini realizzate in campo, con somministrazioni di test di intelligibilità e misure acustiche nelle aule scolastiche, si possono citare gli studi effettuati da Houtgast nel 1981 [40], con bambini da 8 a 15 anni, da Bradley nel 1986 [41], con bambini di 12-13 anni, da Bradley e Sato nel 2008 [42], con bambini da 6 a 11 anni, e da Astolfi e Bottalico nel 2008, con bambini dai 7 ai 10 anni [43].

Le indagini di Bradley e Sato sono state realizzate in aule occupate caratterizzate da un tempo di riverberazione ottimale, pari a 0,4 s, dove l'effetto negativo sull'intelligibilità era provocato solo dalla presenza di rumore. Tra i risultati della ricerca sono stati definiti i valori di rapporto segnale-rumore ottimali in funzione dell'età scolare. Il rapporto segnale rumore indicato dai due autori è pari alla differenza fra il livello del segnale e quello del rumore ponderati A. In particolare, sono indicati valori di rapporto segnale-rumore superiori a 20, 18 e 15 dB per bambini rispettivamente di 6, 8 e 11 anni.

Valori così elevati di rapporto segnale-rumore, superiori a 15 - 20 dB, sono anche consigliati dall'American Speech-Language-Hearing Association [44] e dalla British Association of Teachers of the Deaf [45] per i bambini con problemi di udito. Tra le minoranze presenti all'interno delle aule scolastiche, si possono includere anche i bambini non di madre lingua. La norma UNI EN ISO 9921 pone inoltre l'accento sugli effetti sull'intelligibilità causati da un parlatore o ascoltatore (o da entrambi) non madrelingua. In particolare, in questi casi dovrebbe essere previsto un incremento del rapporto segnale-rumore di almeno 4 dB, corrispondente ad un incremento dell'indice STI di 0,13 e del SIL di 4 dB.

Riferimenti Bibliografici

1. Norma Italiana UNI EN ISO 3382-2:2008. Acustica - Misurazione dei parametri acustici degli ambienti. Tempo di riverberazione negli ambienti ordinari.
2. Schroeder M.R., "New Method of Measuring Reverberation Time", J. Acoust. Soc. Am., pp. 409-412, 1965.
3. Picard M. e Bradley J. S., "Revisiting Speech Interference in Classrooms", Audiology 40, 221-244, 2001.
4. Norma Italiana UNI 11532-2:2020. Acustica – Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati – Metodi di programmazione e tecniche di valutazione. Settore scolastico.
5. DM 11/10/2017 "Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici per la gestione dei cantieri della pubblica amministrazione".
6. Norma Italiana UNI EN 12354-6:2006. Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti - Assorbimento acustico in ambienti chiusi.
7. D.P.C.M. 05/12/1997 "Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici".
8. Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici n. 3150 del 22/5/1967, "Criteri di valutazione e collaudo dei requisiti acustici degli edifici scolastici".
9. D.P.R. del 30/03/2004 n. 142 "Disposizioni per il contenimento e la prevenzione dell'inquinamento acustico derivante dal traffico veicolare, a norma dell'articolo 11 della L. 26 ottobre 1995, n. 447".
10. DPCM del 14/11/97, "Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore".
11. British Standard BS 8233:1999. Sound insulation and noise reduction for buildings – Code of practice.
12. D.P.R. 459, 18/11/98, "Regolamento recante norme di esecuzione dell'art. 11 della legge 26/10/95 in materia di inquinamento acustico derivante da traffico ferroviario".
13. Decreto del Ministero dell'ambiente 31/10/1997 "Metodologia di misura del rumore aeroportuale".
14. Norma Italiana UNI 11367:2010. Acustica in edilizia - Classificazione acustica delle unità immobiliari - Procedura di valutazione e verifica in opera.
15. Norma Italiana UNI EN ISO 12354-3:2017. Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti. Isolamento acustico contro il rumore proveniente dall'esterno per via aerea.
16. Norma Italiana UNI EN 12354-5:2009. Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti - Livelli sonori dovuti agli impianti tecnici.
17. American Standard ANSI S12.2:1995. Criteria for Evaluating Room Noise.
18. Building Bulletin 93, "Acoustic design of school. A design guide.", Department for Education and Skills, London, ISBN 0 11 271105 7.
19. Norma Italiana UNI EN ISO 16283-3:2016. Acustica - Misure in opera dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Isolamento acustico di facciata.
20. Norma Italiana UNI EN ISO 717-1:2021. Acustica - Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Isolamento acustico per via aerea.
21. Piccablotto G., Schede Tecniche per il corso "Progettazione fisico-tecnica dell'ambiente interno", Politecnico di Torino, 2006.
22. Norma Italiana UNI EN ISO 10140-1:2016. Acustica - Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio - Regole di applicazione per prodotti particolari.
23. Cellai G., Secchi S. e Busa L., "La protezione acustica degli edifici – Soluzioni tecniche e informazioni progettuali per il rispetto del DPCM 5/12/97", Alinea, 2005.
24. Norma Italiana UNI EN ISO 16283-1:2018. Acustica - Misure in opera dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Isolamento acustico per via aerea.
25. Department for Education, Acoustic Design of School: a design guide. London, 2015 (<http://ioa.org.uk>).
26. Norma Italiana UNI EN ISO 12354-1:2017. Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti. Isolamento dal rumore per via aerea tra ambienti.
27. Norma Italiana UNI EN ISO 10848-1:2017. Acustica - Misurazione in laboratorio della trasmissione laterale del rumore emesso per via aerea e del rumore di calpestio tra ambienti adiacenti - Parte 1: Documento quadro.
28. Norma Italiana UNI EN ISO 10848-4:2017. Acustica - Misurazione in laboratorio della trasmissione laterale del rumore emesso per via aerea e del rumore di calpestio tra ambienti adiacenti - Applicazione ai giunti con almeno un elemento di tipo A.
29. Norma Italiana UNI EN ISO 10140-3:2015. Acustica - Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio - Misurazione dell'isolamento del rumore da calpestio.
30. Norma Italiana UNI EN ISO 16283-2:2020. Acustica - Misure in opera dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Isolamento acustico dal rumore di calpestio.
31. Norma Italiana UNI EN ISO 717-2:2021. Acustica - Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Isolamento del rumore di calpestio.
32. Norma Italiana UNI EN ISO 12354-2:2017. Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti. Isolamento acustico al calpestio tra ambienti.
33. Norma Italiana UNI EN ISO 15037-3:2011. Prodotti prefabbricati di calcestruzzo - Solai a travetti e blocchi - Blocchi di laterizio.
34. Norma Italiana UNI EN 29052-1:1993. Acustica. Determinazione della rigidità dinamica. Materiali utilizzati sotto i pavimenti galleggianti negli edifici residenziali.
35. Norma Italiana UNI EN ISO 9921:2004. Ergonomia - Valutazione della comunicazione verbale.
36. Norma Italiana UNI EN ISO 3382-1:2009. Acustica - Misurazione dei parametri acustici degli ambienti - Sale da spettacolo.
37. Norma Italiana UNI 11532-1:2018. Acustica - Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati - Metodi di programmazione e tecniche di valutazione. Requisiti generali.
38. Barron M. and L-J., Energy relations in concert auditoriums, J. Acoust. Soc. Am., 84(2) 1988 618-628.
39. Kuttruff H., Room Acoustics, Spon Press, 2009.
40. Houtgast T., "The effect of ambient noise on speech intelligibility in classrooms," Applied Acoustics 14, pp. 15-25, 1981.
41. Bradley J. S., "Speech intelligibility studies in classrooms", J. Acoust. Soc. Am. 80 (3), 845-854, 1986.
42. Bradley J. S. e Sato H., "The intelligibility of speech in elementary school classrooms", J. Acoust. Soc. Am. 123(4), pp. 2078-2086, 2008.
43. Astolfi A. e Bottalico P., "Valutazione dell'intelligibilità del parlato in aule di scuola elementare", in "Acustica e ambienti scolastici", ISBN 978-88-88942-25-4, 2008, pp. 37-61.
44. American Speech-Language-Hearing Association Acoustics in educational settings, ASHA Supplement 14, 1995.
45. British Association of Teachers of the Deaf, Classroom acoustics - recommended standards. BATOD Magazine, January 2001.

Nota: riferimenti bibliografici Cap. 3.4

A. Norma Italiana UNI 11175-1:2021. Acustica in edilizia - Linee guida per la previsione delle prestazioni acustiche degli edifici - Parte 1: Applicazione delle norme tecniche alla tipologia costruttiva nazionale.

B. Norma Italiana UNI 11175-2:2021. Acustica in edilizia - Linee guida per la previsione delle prestazioni acustiche degli edifici - Parte 2: dati di ingresso per il modello di calcolo.

4. Le soluzioni di progetto per il controllo del rumore

In questo capitolo sono descritte e illustrate alcune soluzioni per limitare il rumore in prossimità degli edifici scolastici e all'interno degli stessi. In particolare, per il controllo del rumore esterno sono indicate le strategie per proteggere l'edificio dal rumore delle infrastrutture e di altre sorgenti limitrofe.

Per il controllo del rumore interno, oltre ad indicazioni sulla corretta dislocazione degli spazi, sono indicate le stratigrafie per soddisfare i requisiti di isolamento di facciata, isolamento al rumore aereo delle partizioni tra ambienti interni e isolamento al calpestio.

Tra i rumori prodotti all'interno dell'edificio si elencano le strategie per la riduzione del rumore degli impianti a funzionamento continuo, come gli impianti di climatizzazione, e degli impianti a funzionamento discontinuo, come gli impianti idrosanitari e gli ascensori.

Le tecniche descritte sono finalizzate a soddisfare i requisiti stabiliti dalla legislazione Italiana. In particolare, per quanto riguarda la rumorosità esterna, i valori di riferimento sono definiti dal DPCM del 14/11/1997 [1] "Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore", e per il fonoisolamento e la rumorosità degli impianti i requisiti sono indicati dalle norme tecniche UNI11367 [2] ed UNI 11532-2 [3], entrambe recepite dal DM dell'11 ottobre 2017 in tema di Criteri Ambientali Minimi (CAM) per l'edilizia pubblica [4], e dal DPCM del 5/12/1997 "Requisiti acustici passivi degli edifici" [5].

4.1 IL CONTESTO AMBIENTALE: IL CONTROLLO DEL RUMORE ALL'ESTERNO DELL'EDIFICIO

La progettazione dell'edificio scolastico comincia con la scelta del sito. Molti dei problemi legati all'eccessivo rumore negli ambienti scolastici derivano da un loro inserimento in contesti rumorosi.

Al fine di proteggere l'edificio dal rumore esterno è necessario considerare:

- la localizzazione del sito in relazione alle sorgenti di rumore;
- la riduzione del rumore alla sorgente;
- il posizionamento dell'edificio sul sito;
- l'orientamento dell'edificio sul sito;
- la previsione di barriere acustiche;
- l'incremento del fonoisolamento dell'involucro dell'edificio;
- la progettazione del layout interno dell'edificio.

La legge italiana introduce la suddivisione dei territori comunali in 'zone' acustiche in funzione del valore limite del livello sonoro di immissione diurno e notturno, riferito al rumore immesso nell'ambiente esterno dall'insieme di tutte le sorgenti, rilevato in prossimità dei ricettori. Come riportato nel DPCM del 14/11/1997 "Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore", sono individuate cinque zone acustiche e i corrispondenti valori limite di immissione, prevedendo per le scuole una collocazione in Classe I con valore limite pari a 50 dB(A). Anche nel caso di scuole situate nelle fasce di pertinenza di infrastrutture stradali e ferroviarie, i livelli di immissione nei due periodi (diurno e notturno) non devono essere superati (vedi paragrafo 3.2).

Nel Regno Unito è indicato un valore limite del livello di rumore esterno, misurato in prossimità dell'edificio scolastico, pari a 60 dB(A), mentre nelle aree di ricreazione, sempre all'esterno della scuola, l'obiettivo è un livello sonoro non superiore a 55 dB(A). Un livello di 70 dB(A) permette ancora

il raggiungimento di buone prestazioni acustiche all'interno della scuola, richiedendo però un elevato fonoisolamento dell'involucro esterno o l'utilizzo di barriere o schermi acustici [6].

In Italia, per gli edifici scolastici di nuova costruzione, è prevista la "Valutazione previsionale del clima acustico" per documentare i livelli di rumore ambientale dovuti alla preesistenza di attività e vie di traffico. La normativa che regola la presentazione della valutazione di clima acustico è la Legge Quadro sull'inquinamento acustico n. 447 del 26/10/1995 [7], ma si rimanda alle leggi di emanazione regionale e ai regolamenti comunali per le specifiche modalità di redazione di tale documentazione. Ad esempio, la Legge Regionale 20/10/00 n. 52 [8], emanata dalla Regione Piemonte, riporta le disposizioni per la tutela dell'ambiente in materia di inquinamento acustico in vigore sul territorio piemontese e insieme alla Delibera della Giunta Regionale del 14/02/05, n. 46-14762 [9], fornisce ogni informazione necessaria per la stesura e la presentazione della Valutazione previsionale di clima acustico. La "Valutazione previsionale di clima acustico" deve essere redatta e sottoscritta da Tecnico Competente in Acustica come a norma di legge (art. 2 comma 6 Legge Quadro 26/10/1995) [7].

I livelli prodotti dalle sorgenti di rumore che insistono sul sito possono essere definiti tramite misure, ai sensi del DM 16/3/1998 [10], o simulazioni effettuate in punti significativi dell'area destinata all'insediamento in progetto, tenendo conto dell'altezza dal suolo degli ambienti abitativi.

Rumore delle infrastrutture stradali, ferroviarie e aeroportuali

Tra le sorgenti disturbanti preesistenti, le infrastrutture stradali, ferroviarie e aeroportuali, sono senz'altro tra le più rumorose.

- Il rumore da traffico veicolare dipende da una serie di fattori, quali:
- il flusso del traffico (che può variare considerevolmente all'interno della stessa giornata e tra i giorni della settimana);
- il tipo di veicoli (se prevalentemente pesanti o leggeri);
- le modalità di scorrimento del flusso (strada piana o inclinata);
- le caratteristiche superficiali della strada;
- la velocità del flusso (se continuo o interrotto).

In Tabella 4. 1 sono riportati alcuni livelli sonori tipici dovuti al traffico veicolare misurati ad 1 m dalle facciate degli edifici, in area urbana.

Situazione	L _{Aeq,16h} (dB)
A 20 m dal bordo di un'autostrada percorsa da numerosi veicoli pesanti	78
A 20 m dal bordo di una strada attraverso una zona residenziale, velocità media del traffico di 50 km/h, fondo lastricato	68
Su una strada residenziale parallela a una strada altamente trafficata e schermata da edifici rispetto alla via principale di traffico	58

Tabella 4. 1 - Livelli di rumore tipici per traffico veicolare ad 1 m dalla facciata.

Un tipico spettro di rumore da traffico su strada principale è riportato in Figura 4. 1, tratto dalla norma inglese BS 8233:1999 [11]. I valori sono derivati dalla norma europea UNI EN 1793-3 "Dispositivi per la riduzione del rumore da traffico stradale - Metodo di prova per la determinazione della prestazione acustica. Spettro normalizzato del rumore da traffico" [12].

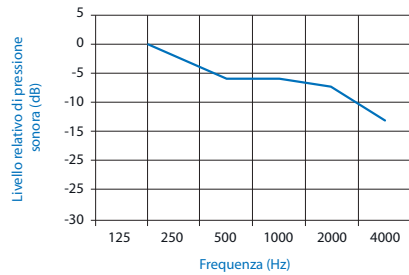


Figura 4. 1 - Spettro normalizzato del rumore da traffico veicolare [11].

Per una tipica situazione urbana, dove la velocità di percorrenza sulla strada è circa 60 km/h, l'energia sonora è concentrata alle basse frequenze a causa del rumore dei tubi di scappamento dei veicoli, in particolare dei veicoli diesel commerciali. Ad elevate velocità, pari a circa 80 km/h, una maggiore energia è presente ad alte frequenze, dovuta all'interazione tra la strada e i pneumatici e al rumore aerodinamico. Queste diverse caratteristiche spettrali dovrebbero essere considerate negli interventi per il controllo del rumore.

Il rumore da traffico ferroviario è caratterizzato da elevati livelli sonori per brevi periodi. Un valore indicativo del livello emesso da una locomotiva di tipo diesel a 25 m di distanza è 90 dB(A). Tuttavia, il livello effettivo dipende dalle condizioni operative con variazioni anche di 20 dB [11]. Uno spettro tipico del rumore ferroviario è riportato in Figura 4. 2 [11].

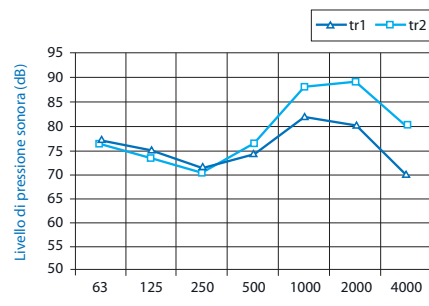


Figura 4. 2 - Spettro normalizzato del rumore di due diversi convogli ferroviari, entrambi ad una velocità di 160 km/h su rotaie convenzionali a saldatura continua, a 25 m dal centro del binario [11].

In alcuni casi può essere opportuno prevedere anche un'analisi delle vibrazioni, ad esempio in presenza di binari ferroviari nel raggio di 30 metri dall'edificio o di una strada con un flusso significativo di veicoli pesanti nel raggio di 20 metri. Tale tipo di analisi coinvolge la valutazione del tipo di terreno da cui dipende la propagazione delle vibrazioni, le quali, raggiunto l'edificio possono essere re-irradiate da alcuni elementi dell'involucro sotto forma di rumore.

La previsione del rumore da traffico aereo è complessa. Per gli aeroporti principali sono disponibili le curve isolivello di pressione sonora, utili per una stima del clima acustico nelle aree limitrofe. La Figura 4. 3 riporta valori tipici di livello continuo equivalente di pressione ponderata A nell'intorno di un aeroporto fornito dalla norma inglese BS 8233 [11]. In Figura 4. 4 è riportato lo spettro tipico del livello medio di rumore di un aereo di linea prima del decollo e dopo l'atterraggio. Dove siano presenti ricettori sensibili è comunque necessario eseguire delle misure sul sito.

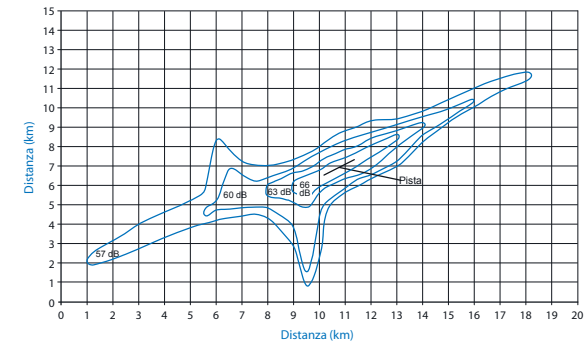


Figura 4. 3 - Valori tipici del livello continuo equivalente di pressione ponderata A nell'intorno di un aeroporto [11].

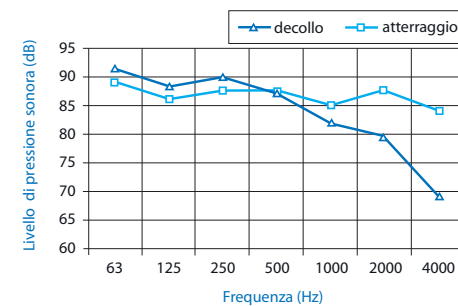


Figura 4. 4 - Spettro del livello medio nella fase di decollo e atterraggio di un aereo di linea [11].

Strategie per la riduzione del rumore all'esterno dell'edificio

La valutazione preventiva di clima acustico può avere influenza sull'orientamento, la forma e la distribuzione volumetrica dell'edificio. L'interposizione di fabbricati meno sensibili al rumore, quali magazzini o uffici, a schermatura di edifici per la didattica, acusticamente più sensibili, è una delle possibili strategie per il controllo del rumore (Figura 4. 5).

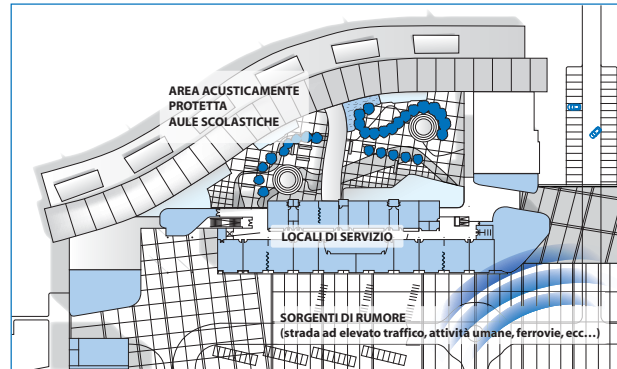


Figura 4. 5 - Esempio di disposizione di fabbricati in presenza di sorgenti di rumore [6].

La collocazione dell'edificio sensibile il più lontano possibile dalla sorgente di rumore rappresenta un ulteriore accorgimento. Per sorgenti puntiformi o considerabili come tali è possibile assumere, in prima approssimazione, una riduzione di livello di pressione sonora di 6 dB per ogni raddoppio della distanza dalla sorgente, mentre per sorgenti lineari, come le strade, la riduzione è pari a 3 dB [13].

A grandi distanze dalla sorgente un'ulteriore attenuazione è dovuta all'assorbimento del suono nell'aria. I valori di assorbimento acustico dell'aria, in dB/km, in funzione della frequenza per alcune combinazioni di temperatura e umidità relativa dell'aria sono riportati in Tabella 4. 2 (Norma ISO 9613-1 [14]).

T (°C)	U.R. (%)	Frequenza centrale delle bande di ottava (Hz)							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
10	70	0.12	0.41	1.04	1.93	3.66	9.66	32.8	117
20	70	0.09	0.34	1.13	2.80	4.98	9.02	22.9	76.6
30	70	0.07	0.26	0.96	3.14	7.41	12.7	23.1	59.3
15	20	0.27	0.65	1.22	2.70	8.17	28.2	88.8	202
15	50	0.14	0.48	1.22	2.24	4.16	10.8	36.2	129
15	80	0.09	0.34	1.07	2.40	4.15	8.31	23.7	82.8

Tabella 4. 2 - Coefficiente di assorbimento acustico dell'aria, in dB/km, per diversi valori della temperatura e dell'umidità relativa dell'aria.

Ulteriori attenuazioni, in positivo o negativo, possono essere dovute agli effetti meteorologici. Tra questi si citano i gradienti verticali di temperatura e di velocità del vento (vedi Figura 4. 6). Se diminuisce la temperatura con l'altezza o se la sorgente è sopravvento si crea una zona d'ombra in prossimità del terreno, con livelli sonori inferiori a quelli che si avrebbero in normali condizioni di propagazione. L'opposto si verifica in condizioni di inversione di temperatura e sottovento, dove si determina un effetto di focalizzazione verso il terreno. In questo caso si possono avere attenuazioni negative, con un incremento del livello di pressione sonora fino a 10 dB a frequenze superiori a 500 Hz.

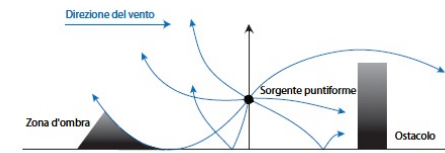
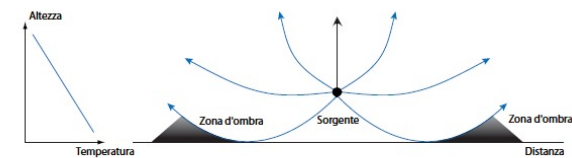
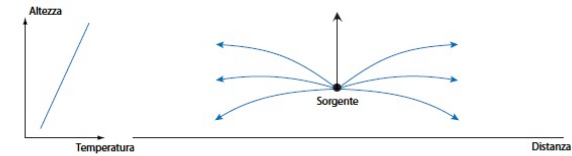


Figura 4. 6 - Effetti delle condizioni meteorologiche sulla propagazione del suono (tratto da [13]).

Al fine di limitare il rumore esterno è possibile prevedere, in sede progettuale, la presenza di elementi territoriali e architettonici che possano fungere da barriere acustiche, come colline o terrapieni. La Figura 4. 7 mostra come l'innalzamento della sede stradale rispetto al piano di costruzione dell'edificio (soluzione (c)), sia la soluzione più efficace per schermare dal rumore di una strada. La soluzione (b) rappresenta un miglioramento, anche se la presenza di uno steccato migliorerebbe la schermatura realizzata dal terrapieno.

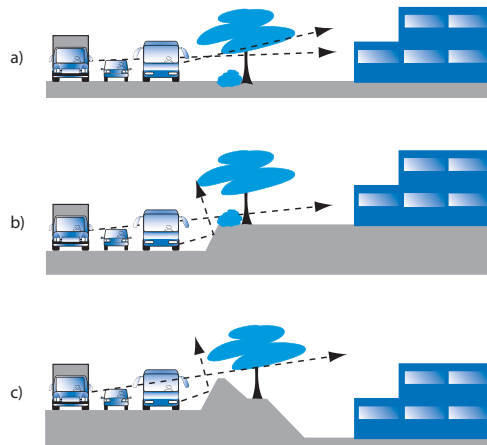


Figura 4.7 - Esempi di collocazione dell'edificio scolastico con soluzioni per il contenimento del rumore da traffico (tratto da [6]).

Le barriere vegetali formate da file di alberi non sono soluzioni efficaci (caso (a) in Figura 4.7), tuttavia possono essere utilizzate come mascheramento di barriere acustiche per migliorarne l'effetto visivo. Per essere acusticamente efficaci le barriere devono avere una massa per unità di superficie superiore ai 12 kg/m^2 [6]. In genere sono costituite da elementi in metallo forato riempiti con materiale fonoassorbente, da elementi in legno, da elementi in plexiglass, etc. In prossimità di edifici residenziali possono essere utilizzate barriere realizzate da manufatti con piante che costituiscono dei muri verdi. Questi ultimi includono i muri cellulari, moduli a vaschetta in calcestruzzo di vario design riempiti con terra vegetale, e le strutture a gabbia, costituite da elementi semplici di materiale vario, come legno, legno impregnato, calcestruzzo vibrato armato, plastica riciclata, metallo, assemblati in vari modi per costituire una struttura a parallelepipedo riempibile di materiale vegetale.

Occorre ricordare che le barriere acustiche sono efficaci nella riduzione del rumore alle medio-alte frequenze piuttosto che alle frequenze più basse; ciò è legato, oltre che alle caratteristiche dei materiali in esse utilizzati, ad effetti di diffrazione delle onde a bassa frequenza che tendono a scavalcare la barriera. In Figura 4.8 è riportata l'attenuazione fornita da una barriera acustica, in dB, a diverse frequenze, basata sulla differenza fra il percorso del suono in presenza della barriera e il percorso del suono senza barriera. I valori di attenuazione variano dai 3-4 dB ai 7-10 dB a seconda della posizione del ricettore rispetto alla barriera e alla sorgente rumorosa.

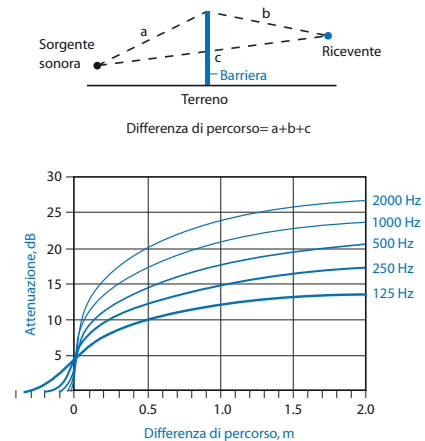


Figura 4.8 - Schema di funzionamento di una barriera acustica e grafico riportante l'attenuazione acustica in funzione della differenza tra il percorso c e il percorso a+b (tratto da [6]).

La scelta di una barriera per la riduzione del rumore deve tenere in conto l'andamento spettrale del rumore che si vuole ridurre. Ad esempio, il rumore proveniente da mezzi pesanti a bassa frequenza non sarà sufficientemente attenuato. L'altezza delle barriere è di norma di almeno 2-4 metri, ma in alcuni casi può raggiungere i 5-6 metri. Un accorgimento progettuale prevede che le barriere acustiche siano trattate con materiali fonoassorbenti sul lato rivolto verso la sorgente, in modo da evitare, con la riflessione del suono prodotta dalla stessa barriera, un incremento del livello sonoro verso altri ricettori sensibili.

Al fine di valutare l'efficacia delle strategie progettuali per la riduzione del rumore sull'area in prossimità dell'edificio scolastico, può essere necessario effettuare verifiche a calcolo. La norma UNI ISO 9613-2 [15] descrive gli algoritmi per la modellazione numerica dei vari fattori che intervengono nella propagazione sonora all'esterno. Nella determinazione del livello di pressione sonora sono considerati la distanza dal ricevitore, la presenza di superfici riflettenti, l'attenuazione acustica dovuta alle condizioni meteorologiche, al terreno, alla vegetazione e alla presenza di elementi schermanti. Qualora si debba caratterizzare un'area di notevole complessità ove siano presenti numerose sorgenti è utile l'uso di modelli di simulazione [16].

4.2 L'AMBIENTE INTERNO: LA DISLOCAZIONE DEGLI SPAZI PER IL CONTROLLO DEL RUMORE

La moderna concezione dell'insegnamento nelle scuole primarie prevede la contemporaneità di attività didattiche fra loro molto diverse. Per tale ragione soluzioni per l'isolamento acustico efficaci per contenere il rumore tra due aule nelle quali si svolga una normale attività didattica possono non essere adeguate quando le aule confinano, ad esempio, con aule di musica. Una attenta dislocazione degli spazi interni può concorrere, quindi, a garantire il controllo del rumore interno.

In generale, è opportuno separare gli ambienti a bassa tolleranza al rumore, quali le aule per la didattica, dagli ambienti particolarmente rumorosi, quali palestre, aule per musica, aule ricreative, mediante spazi cuscinetto come magazzini (per gli strumenti musicali, per attrezzature sportive, o altro), corridoi o zone neutre di passaggio non particolarmente rumorose e sensibili al rumore.

La Figura 4. 9 mostra un possibile layout di spazi con stanze cuscinetto tra locali con requisiti e destinazioni d'uso diverse.

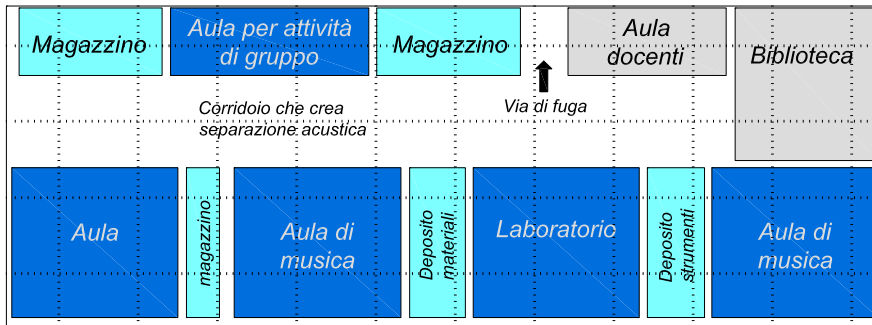


Figura 4. 9 - Esempio di layout di un piano con stanze cuscinetto che separano aule con diversa destinazione d'uso.

Anche il posizionamento delle porte può avere influenza sulla trasmissione del rumore tra aule adiacenti o contrapposte su un corridoio (Figura 4. 10). Per aule adiacenti è opportuno evitare di posizionare le porte di accesso troppo vicine (percorsi 2 e 3: percorso 2 raccomandato; percorso 3 sconsigliato), per ambienti contrapposti evitare di posizionare le porte una di fronte all'altra (percorsi 1 e 4: percorso 1 raccomandato; percorso 4 sconsigliato).

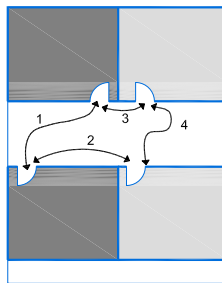


Figura 4. 10 - Trasmissione sonora tra ambienti in funzione del posizionamento delle porte. 1 e 2 più favorevoli, 3 e 4 meno favorevoli.

4.3 L'ISOLAMENTO DELL'EDIFICIO SCOLASTICO DAL RUMORE ESTERNO ED INTERNO

La norma UNI 11367 e il DPCM 5/12/1997 (vedi capitolo 2) stabiliscono i valori limite di alcune grandezze caratterizzanti le prestazioni di isolamento al rumore aereo della facciata e delle partizioni interne verticali e orizzontali e di isolamento al rumore da impatto (o calpestio) dei solai, per gli edifici scolastici.

Una progettazione efficace del fonoisolamento richiede un'attenzione complessiva alla trasmissione sonora attraverso tutti gli elementi che costituiscono l'edificio, senza trascurare gli elementi acusticamente deboli, come le finestre e le porte, e i piccoli elementi quali le aperture, le prese d'aria, etc., che possono compromettere le prestazioni delle partizioni su cui sono inseriti. A questo si aggiunge l'importanza della posa in opera, che se non eseguita a regola d'arte può determinare la presenza di "ponti acustici" di difficile eliminazione a fine lavori. A tal proposito la UNI 11296:2018 "Acustica in edilizia – Posa in opera di serramenti e altri componenti di facciata. Criteri finalizzati all'ottimizzazione dell'isolamento acustico di facciata dal rumore esterno", definisce i criteri per la posa in opera di componenti di facciata e fornisce indicazioni sulla verifica dell'isolamento acustico di facciata dal rumore esterno.

La figura 4.11, che riporta uno schema in pianta di due aule adiacenti, evidenzia gli elementi principali cui porre attenzione nel progetto acustico del fonoisolamento.

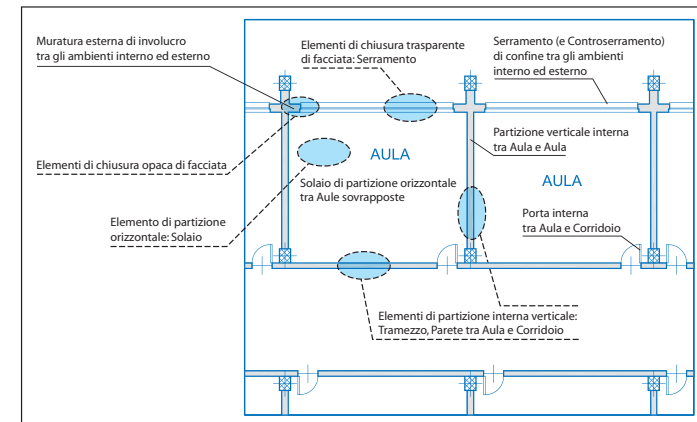


Figura 4. 11 - Descrizione degli interventi per il fonoisolamento in aule scolastiche.

I componenti di facciata possono presentare caratteristiche sia di isolamento acustico sia inerenti alla ventilazione, all'isolamento termico, alla sicurezza, alla trasmissione luminosa, ecc.; la loro installazione non deve, nei limiti della fattibilità, compromettere le prestazioni complessive del sistema facciata in riferimento alle caratteristiche sopra citate (fruibilità degli ambienti interni, apporto di luce naturale, ricambio naturale dell'aria degli ambienti interni ecc.).

4.3.1 L'isolamento acustico di facciata

La UNI 11367, richiamata dai CAM, ed il DPCM 5/12/1997 costituiscono i riferimenti normativi per l'isolamento acustico di facciata e si applicano rispettivamente agli edifici scolastici. La legislazione vigente richiede che le prestazioni acustiche di facciata siano espresse come indice di valutazione del potere fonoisolante normalizzato rispetto al tempo di riverberazione ($D_{2m,nT,w}$) ovvero in termini di livello sonoro immesso nell'ambiente interno, in dB(A) (vedi paragrafo 3.3).

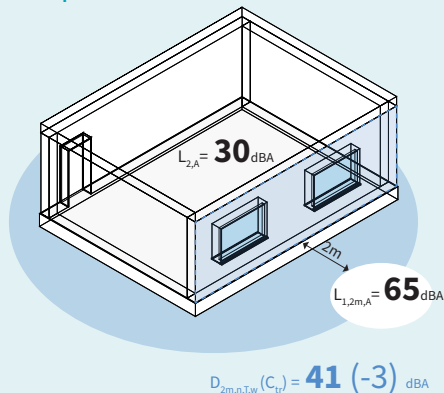
Secondo le più recenti ricerche connesse all'apprendimento e alle condizioni acustiche ottimali da garantire nelle aule scolastiche, un livello di rumore interno (o rumore di fondo) non superiore a 30 dB(A) [17] è ritenuto accettabile per garantire una comprensione ottimale della parola e un adeguato apprendimento.

Il calcolo previsionale dell'indice di valutazione dell'isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione ($D_{2m,nT,w}$) è descritto dalla UNI EN 12354-3 [18] (vedi paragrafo 3.3), che in Appendice descrive anche il metodo per il calcolo del livello di pressione sonora all'interno, normalizzato rispetto al tempo di riverberazione, determinato direttamente dal livello di pressione sonora esterno.

Il calcolo del requisito di isolamento acustico di facciata in funzione dei livelli sonori ammessi nell'ambiente interno è, invece, descritto dalla UNI 11296 [19], di seguito se ne riporta un esempio applicativo. Normalmente il contributo della trasmissione laterale in questo tipo di valutazione è trascurabile.

Tuttavia, se all'interno della stanza ricevente, sono presenti partizioni verticali e orizzontali di tipo rigido collegate tra di loro, le trasmissioni laterali possono contribuire alla trasmissione del suono. Questa potrebbe essere problematica nei casi in cui venga richiesta una prestazione acustica elevata: in questo caso la sottrazione di 2 dB per trasmissione laterale è consigliabile.

Esempio di calcolo



Dati di ingresso:

- Livello di pressione sonora in decibel A (dB(A)) richiesto per l'ambiente interno, $L_{z,A} = 30$ dB(A);
- Tempo di riverberazione dell'ambiente interno, alla frequenza di 500 Hz; $T_{500\text{Hz}} = 1$ s;
- Livello sonoro nell'ambiente esterno a 2 m dalla facciata, dovuto a traffico stradale urbano, $L_{1,2m,A} = 65$ dB(A).

Determinazione del requisito di isolamento acustico di facciata in funzione dei livelli sonori ammessi nell'ambiente interno

Il livello di pressione sonora normalizzato rispetto al tempo di riverberazione in decibel A si ottiene mediante la seguente formula:

$$L_{2,nT,A} = L_{z,A} - 10 \log (T/T_0) = L_{z,A} - 10 \log (1/0.5) = 30 - 3 = 27 \text{ dB(A)}$$

L'isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione in decibel A (dB(A)), $D_{2m,nT,A}$, corrispondente alla somma dell'indice di valutazione dell'isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione, $D_{2m,nT,w}$, ed il termine di adattamento allo spettro C_j (C o C_{tr}), e si ricava mediante la formula:

$$D_{2m,nT,A} = D_{2m,nT,w} + C_j = L_{1,2m,A} - L_{2,nT,A} = 65 - 27 = 38 \text{ dB(A)}$$

Trattandosi di rumore da traffico urbano, il termine di adattamento allo spettro pertinente è il C_{tr} . Ipotizzando che la facciata sia caratterizzata dal seguente valore del termine C_{tr} :

$$C_{tr} = -3 \text{ dB}$$

Si ottiene il valore limite per l'indice di valutazione dell'isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione, $D_{2m,nT,w}$:

$$D_{2m,nT,w} = D_{2m,nT,A} + 3 = 38 + 3 = 41 \text{ dB}$$

Termini di adattamento spettrale

I termini di adattamento spettrale sono stati introdotti poiché forniscono informazioni aggiuntive rispetto al solo indice di valutazione (singolo numero) e permettono di comprendere meglio le prestazioni acustiche della partizione in esame.

I termini di adattamento allo spettro sono:

- C e C_{tr} per l'isolamento ai rumori aerei;
- C_1 per il livello di rumore da calpestio.

I termini C e C_{tr} , descritti nella UNI EN ISO 717-1 [20], si utilizzano per correggere l'indice di valutazione rispetto a sorgenti che emettono rumore, rispettivamente, a medie e alte frequenze (attività umane, traffico ferroviario e autostradale a velocità medie o alte), e a basse e medie frequenze (traffico stradale urbano, traffico ferroviario a bassa velocità). I coefficienti C e C_{tr} hanno generalmente valore negativo, quindi sommarli all'indice di valutazione significa diminuire la prestazione della partizione in esame.

La parete opaca

La parete opaca verticale

L'isolamento acustico delle partizioni (sia verticali che orizzontali) dipende dalla massa dei materiali utilizzati, dalla stratigrafia e dalla presenza di intercapedini d'aria, in alcuni casi parzialmente riempite di materiale poroso o fibroso. Il materiale poroso o fibroso, generalmente usato come isolante termico, determinerà un certo assorbimento acustico nelle intercapedini.

Gli spessi muri di mattoni o di blocchi di calcestruzzo o argilla espansa, a singolo o doppio strato, garantiscono, eventualmente abbinati a strati di isolante poroso fibroso, il soddisfacimento dei requisiti termici e acustici. Lo stesso vale per i tamponamenti leggeri multistrato, realizzati con pannelli di legno o gesso rivestito o con altri materiali come il legno-cemento, etc. Le prestazioni fonoisolanti, definite in termini di indice di valutazione del potere fonoisolante R_w , sono ottenute da misure di laboratorio in accordo con la norma UNI EN ISO 10140-2 [22] e in opera secondo la UNI EN ISO 16283-1 [23].

Il tetto

Il tetto di un edificio costituisce a tutti gli effetti una facciata esterna le cui prestazioni, in termini di isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione, sono analoghe a quelle previste per la facciata verticale.

L'isolamento acustico di una copertura leggera dipende dalla massa dei materiali utilizzati nel comporre la sua stratigrafia e dalla presenza di intercapedini d'aria, in alcuni casi parzialmente riempite di materiale poroso o fibroso. Qualora fosse necessario prevedere un tetto ventilato è necessario incrementare la massa degli strati più a diretto contatto con l'ambiente interno, prima dell'intercapedine ventilata.

Un aspetto a cui prestare attenzione nel caso in cui siano previsti tetti in metallo è il controllo del rumore della pioggia. L'impatto della pioggia battente sulle coperture leggere metalliche o lignee, a causa della loro scarsa capacità di smorzamento interno, può rappresentare una sorgente di rumore significativa e fonte di disturbo negli ambienti sottostanti. La valutazione sperimentale in laboratorio del rumore generato dall'impatto della pioggia su un elemento edilizio è descritta nell'allegato K della norma UNI EN ISO 10140-1 [24].

Questo rumore può raggiungere anche 70 dB(A) nel caso in cui nessun accorgimento sia previsto per la sua attenuazione. La comprensione delle criticità principali legate al sistema tecnologico e la definizione di soluzioni appropriate possono migliorare notevolmente la qualità acustica degli spazi coperti interni.

I tetti realizzati con profilati metallici dovrebbero prevedere adeguati strati smorzanti, separazione degli strati tramite intercapedini d'aria riempite da materiale fonoassorbente poroso, presenza di strati massivi, come ad esempio lastre di gesso rivestito interposte tra gli strati metallici. In Figura 4. 12 è riportato un esempio di tetto in metallo ad alte prestazioni.

La Tabella 4. 3 riporta i valori dell'indice di valutazione del potere fonoisolante R_w , derivati da misure in laboratorio, di diverse tipologie di tetti comunemente utilizzate nell'edilizia italiana. In tabella sono riportate anche stratigrafie a basse prestazioni presenti in molti edifici scolastici esistenti.

Il termine di adattamento allo spettro C è così calcolato:

$$C = X_{A,1} - X_w \quad \text{dB,}$$

dove:

$X_{A,1}$ è la differenza in dB(A) tra i livelli della camera sorgente e ricevente quando viene utilizzato un rumore rosa, X_w è l'indice di valutazione tradizionale.

Il termine di adattamento allo spettro C_{tr} è così calcolato:

$$C_{tr} = X_{A,2} - X_w \quad \text{dB,}$$

dove:

$X_{A,2}$ è la differenza in dB(A) tra i livelli della camera sorgente e ricevente quando viene utilizzato un rumore da traffico, X_w è l'indice di valutazione tradizionale.

Gli spettri del rumore rosa (1) e del rumore da traffico (2) sono forniti dalla norma UNI EN ISO 717-1 per i campi di frequenze estese tra 50 Hz e 5000 Hz.

Il termine C_1 , descritto nella UNI EN ISO 717-2 [21], fornisce valori penalizzanti (positivi) per elevate componenti a bassa frequenza, ad esempio solai dotati di rivestimento resiliente o pavimento galleggiante, mentre fornisce correzioni favorevoli (valori negativi) per elevate componenti ad alta frequenza, ad esempio per solai grezzi.

Il termine di adattamento allo spettro C_1 , con riferimento al livello normalizzato di rumore di calpestio, è così calcolato:

$$C_1 = L_{n,sum} - 15 - L_{n,w} \quad \text{dB,}$$

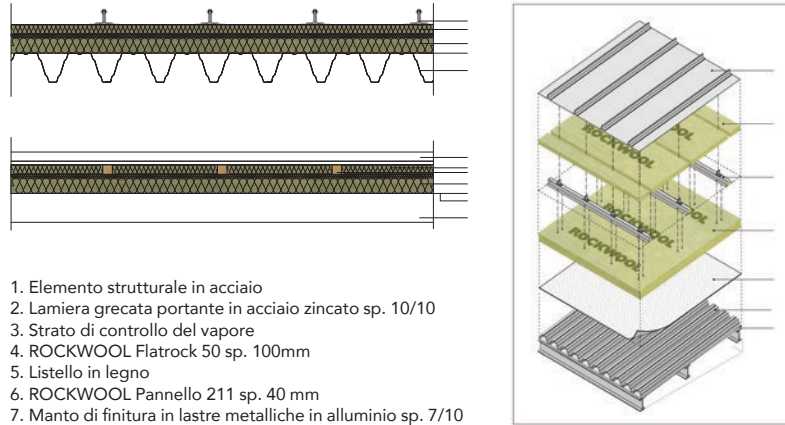
dove:

$L_{n,sum}$ è la somma su base energetica dei livelli normalizzati di rumore di calpestio tra 100 e 2500 Hz.

I termini vengono riportati nei certificati di prova accanto al valore dell'indice di valutazione. Ad esempio:

- $R_w (C; C_{tr}) = 51 (-1; -3)$ dB significa che $R_w = 51$ dB; $C = -1$ dB; $C_{tr} = -3$ dB
- $L_{nw} (C_1) = 67 (-5)$ dB significa che $L_{nw} = 68$ dB; $C_1 = -5$ dB.

Di seguito si analizzeranno in dettaglio i componenti opachi e trasparenti che concorrono a determinare la prestazione acustica globale della facciata.



1. Elemento strutturale in acciaio
2. Lamiera grecata portante in acciaio zincato sp. 10/10
3. Strato di controllo del vapore
4. ROCKWOOL Flatrock 50 sp. 100mm
5. Listello in legno
6. ROCKWOOL Pannello 211 sp. 40 mm
7. Manto di finitura in lastre metalliche in alluminio sp. 7/10

Descrizione del tetto	Indice di valutazione del potere fonoisolante, R_w (dB)
Tetto realizzato mediante travi in legno spessore 12x8 cm distanziate con passo 58 cm e doppio assito di copertura incrociato in abete, sp. 20 e 25 mm.	29
Tetto a falde realizzato con tegole appoggiate su strato impermeabile, pannello in lana minerale spessore 100 mm su soffitto in cartongesso [11].	43
Tetto a falde realizzato con tegole appoggiate su strato impermeabile, pannello in lana minerale spessore 100 mm su soffitto in cartongesso [11].	43
Tetto realizzato con travi di legno 12x8 distanziate con passo 60 cm, doppio assito (perline in legno 20 mm e pannello OSB sp. 15 mm), strato di controllo del vapore, lana di roccia a doppia densità sp. 160 mm (densità media 110 kg/m ³), telo traspirante, listelli di ventilazione, listelli di fissaggio e lastra ondulata in fibrocemento.	48
Tetto in calcestruzzo, spessore 100 mm, massa per unità di superficie 230 kg/m ² [11].	52

Tabella 4. 3 - Valori dell'indice di valutazione del potere fonoisolante di alcune tipologie di tetto comuni, da misure in laboratorio secondo la norma UNI EN ISO 10140-2 [22].

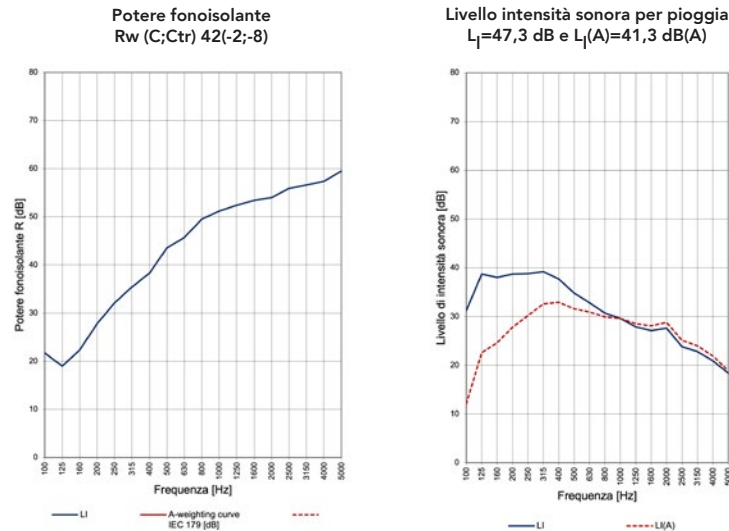


Figura 4. 12 - Stratigrafia di un tetto in profilati metallici con interposta lana di roccia e relativi certificati di potere fonoisolante a norma UNI EN ISO 10140-2 [22] e livello di intensità sonora per pioggia a norma UNI EN ISO 10140-1 [24].

Il serramento vetrato

Il serramento vetrato, che rappresenta la parte più debole della facciata, è comprensivo di vetro, telaio, prese d'aria e cassonetti per gli avvolgibili. Nelle scuole di nuova costruzione e nelle ristrutturazioni di edifici esistenti la corretta posa in opera dei serramenti può garantire le prestazioni acustiche di isolamento di facciata e il miglioramento delle stesse. In generale, i limiti in termini di trasmittanza termica sono molto stringenti e conducono il progettista all'utilizzo esclusivo di vetro camera. I vetri singoli e quelli stratificati non potrebbero soddisfare tali esigenze. Riguardo ai vetri camera si riportano di seguito alcune indicazioni per migliorarne il comportamento acustico:

- i vetri devono avere spessore differente per ridurre perdite dovute a fenomeni di coincidenza;
- l'impiego di vetri camera stratificati migliora le prestazioni fonoisolanti;
- la dimensione dell'intercapedine dei normali vetri camera, da 6 a 16 mm, non influenza le prestazioni fonoisolanti;
- l'inserimento nell'intercapedine di esafluoruro di zolfo (SF₆) migliora le prestazioni rispetto all'impiego di Argon o aria;
- vetrate doppie installate su due telai indipendenti garantiscono prestazioni superiori a vetrate installate su uno stesso telaio.

In Tabella 4. 4 sono riportate formule empiriche per la valutazione di R_w di vetrocamera con vetro monolitico (a), vetrocamera con un vetro monolitico e uno stratificato (c), vetrocamera con due vetri stratificati (d) [25]. Le formule riportate sono state ottenute a seguito di misure di laboratorio e fanno riferimento a finestre a telaio unico, per le quali il valore massimo dell'indice di valutazione del potere fonoisolante R_w è di 40-42 dB. Per prestazioni più elevate è necessario ricorrere ai doppi telai.



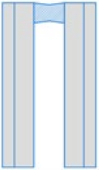
		
a) Vetro camera con due lastre monolitiche	b) Vetro camera con una lastra stratificata	c) Vetro camera con due lastre stratificate
a) $R_w = 12 \log m' + 17 \text{ dB}$, b) $R_w = 12 \log m' + 20 \text{ dB}$, c) $R_w = 12 \log m' + 22 \text{ dB}$, $m' = \text{massa areica (kg/m}^2\text{)}$		

Tabella 4. 4 - Formule empiriche per il calcolo dell'indice di valutazione del potere fonoisolante di vetro-camera [25].

Per quanto riguarda l'utilizzo di vetri singoli, occorre precisare che la pubblicazione della nuova normativa UNI 7697 "Criteri di sicurezza nelle applicazioni vetrarie" [26], del 24 maggio 2014, ha posto fine all'ambiguità di interpretazione della precedente edizione, agevolando così la scelta delle vetrazioni nelle varie applicazioni. La seguente norma, seppur nata in ambito volontario, è resa cogente dal D. Lgs. 6 settembre 2005 [27], n.206 "Codice del consumo, a norma dell'articolo 7 della legge 29 luglio 2003, n. 229", e prescrive che anche le lastre interne di vetrocamere di serramenti siano di sicurezza.

Questo comporta ora che anche sul lato interno delle finestre, si necessita di un vetro stratificato o temperato.

Le caratteristiche di fonoisolamento di una superficie vetrata dipendono fortemente dalla tenuta all'aria del telaio perimetrale; a tal scopo è necessario prevedere serramenti ad elevata tenuta all'aria, cioè classe 4 secondo la norma UNI EN 12207 [28].

Tuttavia, per un vasto numero di vetrate, precisamente aventi R_w minore di 37 dB, la trasmissione sonora attraverso il telaio della finestra può essere trascurata se l'area dell'elemento corrisponde a quella della vetrata più il telaio.

Il materiale di cui è costituito il telaio (legno, acciaio, alluminio, pvc, etc.) non influisce in modo sensibile sulla prestazione acustica della vetrata. In linea generale, se la massa per unità di superficie del telaio, valutata considerando gli spessori "utili" ai fini acustici nella sezione del telaio, è superiore al 70% della massa del vetro e la superficie esposta del telaio è inferiore al 25% della superficie complessiva del serramento (vetro più telaio), si può ritenere che il potere fonoisolante del serramento sia sostanzialmente pari a quello della vetrata [25].

Per le scuole sono considerati solo serramenti caratterizzati da un indice R_w oltre i 40 dB, per i quali sono sempre presenti una guarnizione centrale e le guarnizioni esterne in corrispondenza della battuta dei telai (Figura 4. 13).

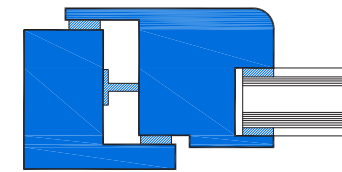


Figura 4. 13 - Esempio di telaio nel quale sono presenti una guarnizione centrale e le guarnizioni esterne in corrispondenza della battuta.

Per vetrocamera con R_w compreso fra 38 e 41 dB, se il telaio è realizzato con una guarnizione centrale e guarnizioni esterne in corrispondenza della battuta dei telai, il potere fonoisolante del serramento, comprensivo di vetro più telaio, è pari al potere fonoisolante del vetro. Per vetrocamera con R_w superiore a 41 dB, il potere fonoisolante del serramento sarà inferiore a quello del vetro-camera, pur essendo presenti le medesime guarnizioni.

Per quanto riguarda i serramenti vetrati, in assenza di dati specifici, il potere fonoisolante può essere ricavato sulla base del metodo descritto nell'appendice B della UNI EN 14351-1 [29] a cui si rimanda, dal momento che si limita a serramenti non particolarmente performanti ed ormai poco utilizzati, con valori dell'indice di valutazione del potere fonoisolante $R_w \leq 39 \text{ dB}$ o $R_w + C_{tr} \leq 35 \text{ dB}$; per valori superiori occorre che questi vengano determinati mediante prova che generalmente include nel potere fonoisolante misurato, l'effetto della sigillatura tra contro telaio e muratura.

Ai fini acustici è di primaria importanza la corretta realizzazione dei giunti d'interfaccia serramento-vano. In particolare, la natura, la geometria e la dimensione degli stessi è fondamentale per prevenire inconvenienti nella posa del serramento e non comprometterne le prestazioni.

Per garantire una sigillatura durevole ed efficace non basta scegliere soltanto un prodotto adeguato, ma occorre un'attenta progettazione del giunto d'interfaccia tra serramento e vano. È sempre preferibile l'inserimento del fondo giunto (Figura 4. 14) e l'utilizzo di materiali sigillanti a basso modulo di elasticità.

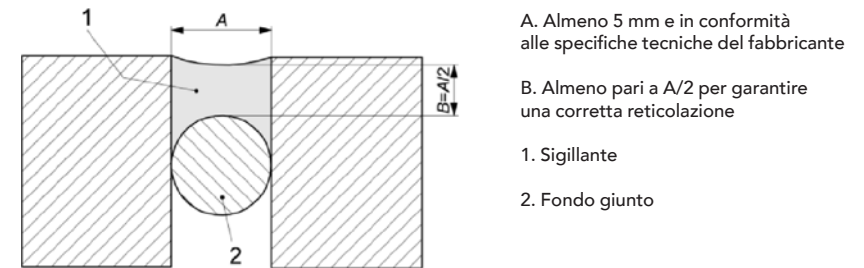


Figura 4. 14 – Schematizzazione di un giunto dotato di fondo giunto.

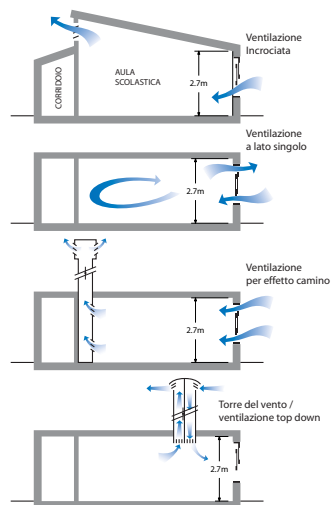
Tra gli elementi sensibili di un serramento vetrato, dopo il vetro e il telaio, si considerano le prese d'aria e i cassonetti. Le prese d'aria saranno trattate nel paragrafo successivo, mentre per i cassonetti, quasi mai utilizzati nelle aule scolastiche, sono disponibili pochi dati di laboratorio per poter determinare una classificazione in base alla prestazione acustica. La loro presenza, però, se non ottimizzata dal punto di vista del fonoisolamento, può portare a riduzioni fino a 5 dB dell'isolamento acustico della partizione. Inoltre questi elementi sono per lo più certificati insieme al serramento vetrato e ciò rende indisponibile il dato di isolamento acustico normalizzato rispetto all'assorbimento acustico dell'elemento, $D_{n,e,w}$, utilizzabile in fase di progetto.

La ventilazione naturale e le bocchette d'aerazione

Nelle aule e negli altri ambienti scolastici, a causa della presenza di un elevato numero di persone e di attrezzature, deve essere garantito un ben definito numero di ricambi orari di aria esterna, espressi in volumi/ora, così come previsto dal D.M. 18/12/1975 [30] per scuole di diverso grado e ambienti a diversa destinazione d'uso.

La scelta del tipo di ventilazione, naturale o meccanica, può essere guidata da ragioni di tipo acustico. Se il livello di rumore esterno eccede i 60 dB(A) la semplice ventilazione naturale (apertura delle finestre) può non essere una scelta opportuna, vanificando ogni sforzo per un adeguato isolamento nel momento in cui gli utenti devono aprire le finestre per il rinnovo dell'aria. In ogni caso, prima di prevedere la ventilazione meccanica, è sempre meglio valutare le opportunità offerte dalla ventilazione naturale, eventualmente con l'adozione di dispositivi di attenuazione acustica. In Figura 4. 15 è riportato uno schema delle possibili modalità di ventilazione naturale da adottare in aule scolastiche.

POSSIBILI INTERVENTI DI ISOLAMENTO ACUSTICO



Vetri doppi con apertura sfalsata; presa d'aria acusticamente trattata e con portata elevata.

Vetri doppi con apertura sfalsata.

Rivestimento interno del condotto fonoassorbente; aperture esterne acusticamente trattate; vetri doppi con apertura sfalsata; presa d'aria acusticamente trattata e con portata elevata.

Rivestimento interno del condotto fonoassorbente; aperture esterne acusticamente trattate; vetri doppi con apertura sfalsata; plenum di attenuazione.

Figura 4. 15 - Schema delle possibili modalità di ventilazione naturale per le aule scolastiche (tratto da [6]).

In generale, per contenere i livelli di rumore è necessario adottare bocchette di aerazione con elevate proprietà fonoisolanti in modo da non compromettere le prestazioni dell'intero involucro esterno. La prestazione acustica delle bocchette e dei piccoli elementi inseriti nelle partizioni di un edificio si valuta attraverso la determinazione dell'indice di valutazione dell'isolamento acustico normalizzato rispetto all'assorbimento acustico di un piccolo elemento, $D_{n,e,w}$. La misura è effettuata in laboratorio secondo la norma UNI EN ISO 10140-2 [22] e in opera secondo la norma UNI EN ISO 16283-3 [31]. Per piccoli elementi si intendono elementi con area minore di 1 m², escludendo porte e finestre. In genere rientrano tra questi le bocchette di ventilazione, gli ingressi d'aria e i cassonetti per dispositivi oscuranti.

Nel caso di ingressi d'aria non insonorizzati l'indice di valutazione dell'isolamento normalizzato del piccolo elemento è calcolato con la formula:

$$D_{n,e,w} = -10 \log \left(\frac{S_{\text{apertura}}}{10} \right) \text{ dB}, \quad (4.1)$$

dove S_{apertura} è l'area dell'apertura in metri quadrati. Nel caso in cui siano presenti in gran numero piccoli elementi identici di cui si conosce l'isolamento acustico misurato in laboratorio, l'indice si può ricavare dall'espressione:

$$D_{n,e,w} = D_{n,e,w,\text{lab}} - 10 \log (n_e) \text{ dB}, \quad (4.2)$$

dove n_e è il numero degli elementi, e analogamente, nel caso di piccoli elementi per i quali una dimensione è trascurabile rispetto le altre, quali ad esempio bocchette a fessura, si applica la relazione:

$$D_{n,e,w} = D_{n,e,w,\text{lab}} - 10 \log \left(\frac{l_{\text{situ}}}{l_{\text{lab}}} \right) \text{ dB}, \quad (4.3)$$

dove:

l_{situ} = lunghezza dell'elemento in opera, in metri;

l_{lab} = lunghezza dell'elemento provato in laboratorio, in metri.

I valori dell'indice di valutazione dell'isolamento normalizzato dei dispositivi d'ingresso d'aria è funzione della portata di ventilazione: a portate d'aria superiore corrispondono valori dell'indice inferiori. Tuttavia, è bene sottolineare che l'adozione esclusiva di questi dispositivi non consente di soddisfare i ricambi d'aria in volumi/ora indicati dal D.M. 18/12/1975.

In Figura 4. 16 sono riportati, a titolo esemplificativo, degli esempi di configurazione di posa di dispositivi di ventilazione.

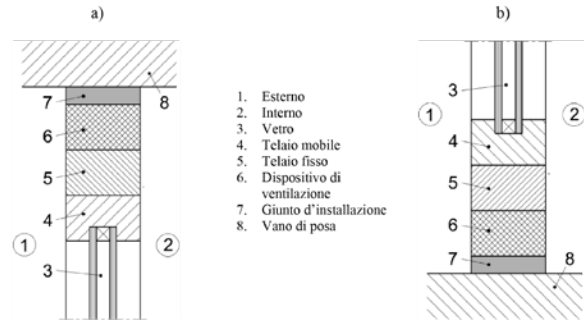


Figura 4.16 - Esempio di dispositivo di ventilazione inserito superiormente (a) ed inferiormente (b) tra il telaio fisso del serramento ed il vano di installazione

Le prese d'aria possono essere collocate sia sul serramento che sulla parte opaca del rivestimento esterno. In Figura 4.17 si riporta un esempio di posizionamento di una presa d'aria sul solaio del sottotetto, schermata dal rumore del traffico aereo [32].

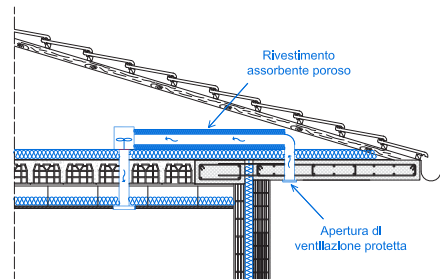


Figura 4.17 - Presa d'aria posizionata in una zona dell'edificio schermata dal rumore del traffico aereo (tratto da [32]).

L'isolamento acustico normalizzato dei piccoli elementi può essere influenzato dalla loro ubicazione rispetto a pareti e/o soffitti riflettenti (interni o esterni) e dalla direzione di incidenza del suono. Ad esempio, in prossimità di un angolo formato da due o tre piani riflettenti è stata riscontrata una riduzione da 0 a 5 dB per frequenze da 125 a 500 Hz, in bande di ottava. In presenza di aperture di aerazione, quando il suono è diretto sull'apertura, è stata riscontrata una riduzione da 1 a 3 dB [18].

In molti casi la ventilazione in entrata e in uscita è ottenuta grazie ad un sistema di condotti che possono costituire dispositivi di attenuazione sonora (vedi paragrafo 4.4). I camini di ventilazione, che realizzano il tratto terminale del sistema, hanno la possibilità di schermare o allontanare l'ingresso dell'aria dalla sorgente di rumore grazie all'orientamento e all'elevazione del camino. Si riporta in Figura 4.18 lo schema di funzionamento di un camino di ventilazione.

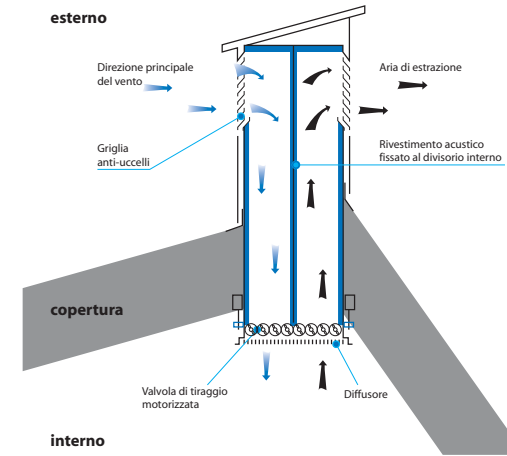
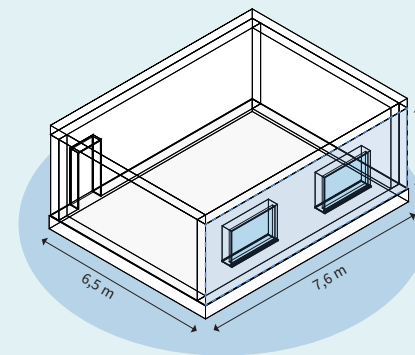


Figura 4.18 - Schema camino di ventilazione.

Per i camini di ventilazione è previsto il trattamento fonoassorbente all'interno del condotto e la presenza di lamelle acustiche per l'ingresso e l'uscita dell'aria. Le lamelle inclinate schermano il suono diretto e ostacolano al minimo il deflusso dell'aria. La loro efficacia aumenta quando le lamelle sono cave, forate in superficie e riempite di materiale fonoassorbente poroso o fibroso.

Una doppia serie di lamelle o più serie di lamelle aumenta la prestazione fonoisolante dell'apertura ma limita fortemente lo scorrimento del flusso d'aria. L'attenuazione è maggiore alle alte frequenze a causa della diffrazione, tipica delle basse frequenze.

Esempio di calcolo



Dati di ingresso:

- area totale della facciata, $S = 22,8 \text{ m}^2$;
- area degli elementi costituenti la facciata: finestra, $S_f = 13,2 \text{ m}^2$;
- volume dell'ambiente ricevente, $V = 148,2 \text{ m}^3$;
- indice di valutazione del potere fonoisolante degli elementi costituenti la facciata:
 - parete opaca: $R_w = 57,0 \text{ dB}$;
 - finestra, serramento con vetrocamera e doppi vetri stratificati: $R_w = 44,4 \text{ dB}$.

I tramezzi interni

Calcolo dell'indice di valutazione del potere fonoisolante apparente di facciata
Si assume un contributo della trasmissione laterale K pari a 2 dB. Si applica quindi la formula (3.9):

$$R'_w = -10 \log \left\{ \left(\frac{S_{\text{finestre}}}{S_{\text{facciata}}} \cdot 10^{\frac{R_w}{10}} + \frac{S_{\text{parete}}}{S_{\text{facciata}}} \cdot 10^{\frac{R_w}{10}} \right) + \left(\frac{A_0}{S_{\text{facciata}}} \cdot 10^{\frac{D_{\text{ng,w}}}{10}} \right) \right\} - 2 =$$

$$= -10 \log \left\{ \left(\frac{13,2}{22,8} \cdot 10^{\frac{44,4}{10}} + \frac{22,8 - 13,2}{22,8} \cdot 10^{\frac{57,0}{10}} \right) \right\} - 2 =$$

$$= -10 \log \left(2,1020 \cdot 10^{-5} + 8,4011 \cdot 10^{-7} \right) - 2 = 44,6 \text{ dB}$$

In questo caso non viene presa in considerazione la presenza di piccoli elementi.

Calcolo dell'indice di valutazione dell'isolamento acustico di facciata
Trattandosi di una facciata piana (senza balconi né cornicioni) il termine correttivo che tiene conto della forma della facciata, ΔL_{fs} , assume un valore pari a 0 dB. L'indice di valutazione dell'isolamento di facciata si ottiene applicando la (3.8):

$$D_{2m,nT,w} = 44,6 + 0 + 10 \log \left(\frac{148,2}{6 \cdot 0,5 \cdot 22,8} \right) = 48,0 \text{ dB}$$

Il valore ottenuto dell'indice $D_{2m,nT,w}$ è il valore da confrontare con i limiti normativi (cfr. Tabella 3.10).

4.3.2 L'isolamento acustico delle partizioni interne

Le partizioni interne si dividono in partizioni verticali fra aula e aula (o tra ambiente scolastico e ambiente scolastico), partizioni fra aula e corridoio e partizioni orizzontali (solai). Per ciascuna di suddette tipologie di partizioni, i CAM richiamano la norma UNI 11367 per gli edifici scolastici pubblici. La UNI 11367 definisce i requisiti in termini di indice del potere fonoisolante apparente di partizioni fra ambienti di differenti unità immobiliari (R'_w) ed indice di isolamento acustico normalizzato per partizioni fra ambienti della medesima unità immobiliari ($D_{nT,w}$). Il DPCM 5/12/97 definisce i requisiti in termini di indice del potere fonoisolante apparente di partizioni fra ambienti (R'_w). Il decreto del '97 non differenzia fra tipologia di componente e stabilisce un valore superiore a 50 dB, riferendo tale prestazione a elementi di separazione tra due distinte unità immobiliari (vedi paragrafo 3.4).

Per ottenere un basso rumore di fondo nelle aule, considerando che i livelli sonori possano raggiungere i 77 dB(A) nel caso di attività di gruppo (vedi paragrafo 1.1), è necessario prevedere partizioni verticali con elevate prestazioni fonoisolanti.

Per la tipologia di partizione orizzontale, date le elevate masse per unità di superficie dei solai in laterocemento usati nell'edilizia tradizionale italiana, il requisito di legge è verificato nella maggioranza dei casi.

I tramezzi interni verticali tra aula e aula (o tra ambiente scolastico e ambiente scolastico) possono essere costituiti da pareti pesanti monostrato o a due strati separati da un'intercapedine d'aria o da pareti leggere semplici o doppie.

Le pareti pesanti sono realizzate con blocchi di laterizio, blocchi di calcestruzzo o argilla espansa, o altri blocchi ad elevata massa superficiale. I blocchi sono fissati sia in orizzontale che in verticale mediante uno strato di malta. Le pareti sono generalmente intonacate su entrambi i lati e nel caso di pareti doppie fra i due strati è inserito uno strato di materiale fonoassorbente poroso a parziale riempimento dell'intercapedine. Per incrementare le prestazioni delle pareti doppie è possibile adottare accorgimenti, quali:

- l'impiego di strati elastici per il disaccoppiamento delle strutture;
- la realizzazione di un'intercapedine di almeno 5-10 cm;
- l'interposizione di materiale fonoassorbente poroso (fibroso) a parziale riempimento dell'intercapedine;
- la realizzazione di partizioni murarie di diverso spessore (8 cm - 12 cm).

Le pareti leggere sono realizzate generalmente con lastre di gesso rivestito e struttura portante in montanti di lamiera piegata. Le prestazioni fonoisolanti dipendono dal numero di lastre, dalla dimensione delle intercapedini, dall'interasse tra i telai e dalle modalità di posa in opera. Si possono realizzare pareti semplici, con una sola lastra per parte, o pareti più complesse con più lastre stratificate su uno o su entrambi i lati, con ossatura di sostegno unica o due ossature separate. L'intercapedine è parzialmente riempita con materiale fibroso fonoassorbente. I divisori in gesso rivestito sono molto leggeri, con masse per unità di superficie che difficilmente superano i 70-80 kg/m², e sono caratterizzati da elevate prestazioni dovute alla stratificazione e allo smorzamento offerto dalla struttura [25]. Le migliori prestazioni si hanno con pareti doppie costituite da due telai fra loro separati.

Per la previsione dell'indice di valutazione del potere fonoisolante di partizioni verticali e orizzontali, esistono diverse formule empiriche basate sulla massa per unità di superficie degli elementi coinvolti. In Tabella 4. 5 sono riportate alcune formule per la determinazione di R_w nel caso di pareti monostrato, pareti doppie, pareti leggere e solai [25].

Per $m' > 80 \text{ kg/m}^2$ ed intercapedine uguale o minore di 5 cm, la determinazione dell'indice R_w si può ottenere dalla seguente relazione:

$$R_w = 20 \log m' \text{ dB}, \quad (4.4)$$

mentre per $m' > 150 \text{ kg/m}^2$ si può ottenere una valutazione facendo ricorso alla seguente relazione [33]:

$$R_w = 37,5 \log m' - 42 \text{ dB}, \quad (4.5)$$

Per partizioni monostrato in elementi di laterizio forati, aventi percentuale di foratura non superiore al 65% e caratterizzati da fori distribuiti pressoché uniformemente sulla faccia dell'elemento, posati con giunti orizzontali e verticali di malta, il valore dell'indice di valutazione R_w è ben rappresentato dalla relazione (4.4) per $80 \text{ kg/m}^2 < m' \leq 250 \text{ kg/m}^2$, dalla relazione (4.5) per $250 \text{ kg/m}^2 < m' \leq 380 \text{ kg/m}^2$ e dalla seguente relazione (4.6) per $m' > 380 \text{ kg/m}^2$:

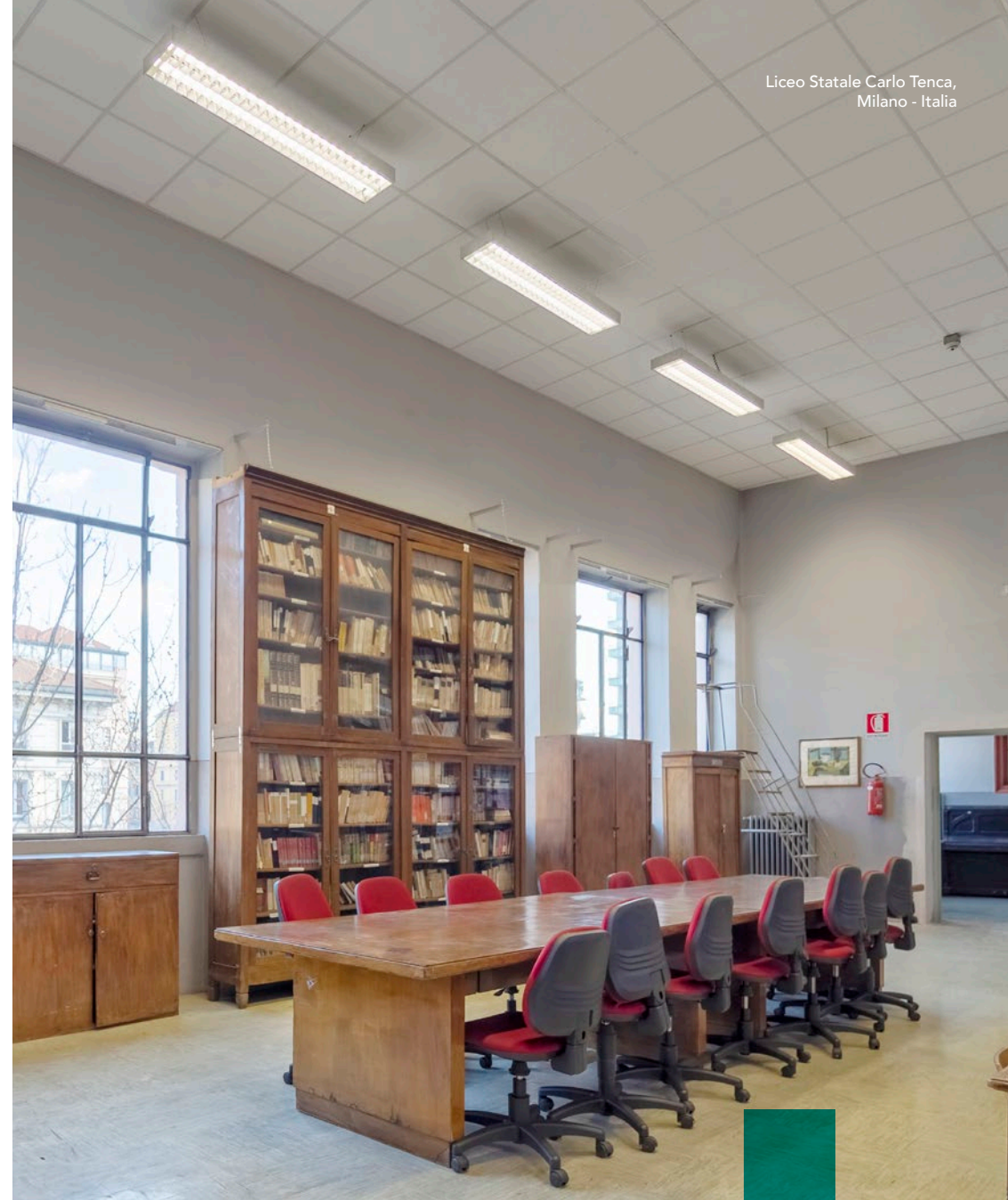
$$R_w = [(37,5 \log m' - 42) + (20 \log m')]/2 \text{ dB}, \quad (4.6)$$

Elemento	Formula per il calcolo di R_w (dB)	Tipologia di materiali	Limiti di applicazione	Note
Laterizi				
Pareti semplici	$R_w = 16 \log m' + 7$	Mattoni pieni o forati	$m' = 80 \div 400$ kg/m ²	Pareti intonacate, spessore dell'intercapedine almeno di 5 cm, riempita con materiale fonoassorbente
Pareti doppie	$R_w = 16 \log m' + 10$			
Solai	$R_w = 23 \log m' - 8$	Blocchi forati in laterizio (pignatte)	$m' = 250 \div 500$ kg/m ²	Blocchi con soletta in cemento armato intervallati da travetti in cemento armato
Blocchi di argilla espansa				
Pareti semplici e doppie	$R_w = 26 \log m' - 11$	Limiti di applicazione		Intercapedine vuota
		$m' = 115 \div 450$ kg/m ² densità = 750 ÷ 1600 kg/m ³ % foratura = 0 ÷ 40 % spessore totale = 0,11 ÷ 0,33 m		
Lastre di gesso rivestito				
Pareti ad "ossatura unica"	$R_w = 20 \log m' + 20 \log d + e - 5$ (*) $R_w = 20 \log m' + 20 \log d + e + 5$ (**)	d = profondità dell'intercapedine e = spessore del pannello fibroso, 6 ÷ 8 cm		Non risulta avere particolare influenza lo spessore delle singole lastre, a parità di massa areica del divisorio
Pareti con "due ossature separate"	$R_w = 20 \log m' + 10 \log d + e + 10$ (**)			

(*) Dati INRIM (Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, ex "Istituto Galileo Ferraris" di Torino) [34].

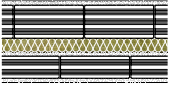
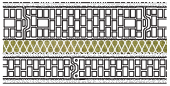
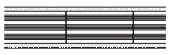
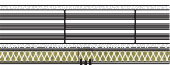
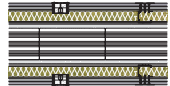
(**) Norma DIN 4109-1 [35].








Tabella 4. 5 - Formule empiriche e limiti di applicazione per il calcolo dell'indice di valutazione del potere fonoisolante per diversi elementi edilizi, in funzione della tipologia dei materiali tratte da [25].

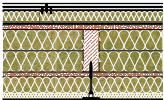



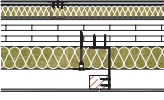




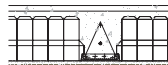
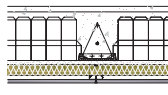
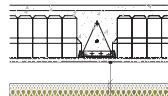
In Tabella 4. 6 sono riportati degli esempi di partizioni pesanti e leggere, soluzioni per strutture timber frame e CLT tratti dal repertorio di soluzioni per l'isolamento acustico testate in laboratorio con lana di roccia ROCKWOOL [36]. Considerando la perdita di trasmissione attraverso gli elementi laterali per soddisfare il requisito di legge si dovrà optare per una partizione di separazione caratterizzata, nel caso di parete pesante, da R_w superiore a 53-54 dB, e nel caso di parete leggera, superiore a 58-60 dB.

Tabella 4. 6 - Indici di valutazione delle prestazioni acustiche, e termini di adattamento spettrale di alcune tipologie comuni di divisori realizzati in lana di roccia, dei quali si riportano inoltre la composizione, lo spessore totale e la massa superficiale [36].

Schema di montaggio	Composizione parete	Spessore totale (m)	Massa superficiale (kg/m ²)	R_w (C, C _{tr}) (dB)
Doppia muratura con intercapedine				
 IG 186402	Intonaco 15 mm Muratura in mattoni forati 120 mm Intonaco 15 mm Acoustic 225 Plus sp. 50 mm Muratura in mattoni forati 80 mm Intonaco 15 mm	0,295	210	54(-2;-5)
 IG 173516	Intonaco 15 mm Muratura in mattoni semipieni Alveolater 80 mm Intonaco 15 mm Acoustic 225 Plus sp. 50 mm Muratura in mattoni semipieni Alveolater 120 mm Intonaco 15 mm	0,295	250	57(-1;-3)
Contropareti su muratura				
 IG 309556	Intonaco 15 mm Muratura in mattoni forati F/A≤55% sp. 120 mm Intonaco 15 mm	0,15	140	44(-1;-4)
 IG 309556	Doppia lastra standard in gesso rivestito Orditura 50 mm + Acoustic 225 Plus sp. 40 mm intercapedine d'aria 5 mm Intonaco 15 mm Muratura in mattoni forati F/A≤55% sp. 120 mm Intonaco 15 mm	0,23	170	64 (-2;-8)
 IG 354379	1 lastra in gesso rivestito Solidtex BA13 1 lastra in gesso rivestito SoundBoard BA13 + 2 prese elettriche Orditura 50 mm + Acoustic 225 Plus sp. 40 mm Intercapedine d'aria 5 mm Intonaco 1,5 mm Muratura in mattoni forati 120 mm Intonaco 1,5 mm Intercapedine d'aria 5 mm Orditura 50 mm + Acoustic 225 Plus sp. 40 mm 1 lastra in gesso rivestito Solidtex BA13 1 lastra in gesso rivestito SoundBoard BA13 + 2 prese elettriche	0,31	215	72(-2;-5)

Schema di montaggio	Composizione parete	Spessore totale (m)	Massa superficiale (kg/m ²)	R_w (C, C _{tr}) (dB)
Pareti leggere				
 IG 354380	1 lastra in gesso rivestito Solidtex BA13 Orditura 75 mm + Airrock DD sp. 60 mm 1 lastra in gesso rivestito Solidtex BA13	0,1	36	53 (-2;-7)
 IG 304155	2 lastra in gesso rivestito PregyPlac BA13 Orditura 50 mm + Acoustic 225 Plus sp. 40 mm 2 lastra in gesso rivestito PregyPlac BA13	0,1	40	53 (-6;-14)
 132-2018-IAP Zlab	2 lastra in gesso rivestito sp. 12,5 mm + 2 prese elettriche Orditura 50 mm + Pannello 211 sp. 40 mm Intercapedine d'aria 10 mm Orditura 50 mm + Pannello 211 sp. 40 mm 2 lastra in gesso rivestito sp. 12,5 mm + 2 prese elettriche sfalsate in altezza	0,16	40	64(-4;-10)
 IG 376754	lastra in gesso rivestito Solidtex BA13 + 2 scatole elettriche 1 lastra in gesso rivestito PregyPlac BA13 Orditura 75 mm + Airrock DD sp. 60 mm 1 lastra in gesso rivestito Solidtex BA13 Intercapedine d'aria 5 mm Orditura 75 mm + Airrock DD sp. 60 mm 1 lastra in gesso rivestito PregyPlac BA13 1 lastra in gesso rivestito Solidtex BA13 + 2 scatole elettriche	0,22	71	68(-2;-8)
Cappotto su muratura				
 042-2015-IAP Zlab	Intonaco 15 mm Muratura in mattoni semipieni (f<44%) sp. 250 mm Intonaco 15 mm	0,28	220	47,8 (0;-3)
 042-2015-IAP	Ciclo di finitura REDArt Frontrock Max Plus sp. 100 mm Intonaco 15 mm Muratura in mattoni semipieni (f<44%) sp. 250 mm Intonaco 15 mm	0,387	245	61,2 (-2;-7)
Soluzioni per strutture timber frame				
 IG 371258	Pannello OSB 18 mm Struttura a telaio in legno 160 mm + Acoustic 225 Plus sp. 80+80 mm Pannello OSB 18 mm	0,196	40	42(-3;-8)

Schema di montaggio	Composizione parete	Spessore totale (m)	Massa superficiale (kg/m ²)	R _w (C, C _{tr}) (dB)
Soluzioni per strutture timber frame				
 IG 371258	Ciclo di finitura REDArt Frontrock Pro sp. 80 mm Pannello OSB 18 mm Struttura a telaio in legno 160 mm + Acoustic 225 Plus sp. 80+80 mm Pannello OSB 18 mm Aria 5 mm Orditura 50 mm + Pannello 211 sp. 40 mm 2 lastre in gesso rivestito sp. 12,5 mm	0,363	80	60 (-3;-13)
 IG 371260	Rockpanel sp. 8 mm Intercapedine d'aria 75 mm Fixrock 33 VF sp. 80 mm Pannello OSB 18 mm Struttura a telaio in legno 160 mm + Acoustic 225 Plus sp. 80+80 mm Pannello OSB 18 mm Intercapedine d'aria 5 mm Orditura 50 mm + Pannello 211 sp. 40 mm 2 lastre in gesso rivestito sp. 12,5 mm	0,436	75	67 (-4;-11)
Soluzioni per strutture CLT				
 IG 376752	Pannello CLT 100 mm	0,1	55	32 (0;-3)
 IG 376752	Ciclo di finitura REDArt Frontrock Pro sp. 100 mm Pannello CLT 100 mm Intercapedine d'aria 5 mm Orditura 75 mm + Airrock DD sp. 60 mm Lastra in gesso rivestito LaDura Plus BA13 Lastra in gesso rivestito PregyPlac BA13 + 2 scatole elettriche	0,31	130	63 (-4;-10)
 IG 331688	Rockpanel sp. 8 mm Intercapedine d'aria 75 mm Fixrock 033 VS sp. 80 mm Pannello CLT 100 mm Intercapedine d'aria 5 mm Orditura 50 mm + Acoustic 225 Plus sp. 40 mm 1 lastra in gesso fibra sp. 12,5 mm 1 lastra in gesso rivestito sp. 12,5 mm	0,343	125	68 (-3;-9)
Solai				
 PEUTZ A 3231-2E-RA-002-6ab	Massetto in sabbia e cemento sp. 50 mm Floorrock TE sp. 20 mm Solaio normalizzato in c.a. 140 mm	0,07	95	$\Delta L_w = 27$ dB
 PEUTZ A 3231-2E-RA-002-10ab	Massetto in sabbia e cemento sp. 50 mm Floorrock TE sp. 50 mm Solaio normalizzato in c.a. 140 mm	0,10	95	$\Delta L_w = 37$ dB

Schema di montaggio	Composizione parete	Spessore totale (m)	Massa superficiale (kg/m ²)	R _w (C, C _{tr}) (dB)
 IG 354384 e IG354386	Solaio laterocemento 16+40 mm Intonaco 15 mm	0,215	278	46(0;-3) L _{n,w} (C ₁) = 89(-13)
 IG 354384 e IG354386	Solaio laterocemento 16+40 mm Intonaco 15 mm Staffe registrabili con gomma antivibrante sp. 55 mm Pannello 211 sp. 40 mm 1 lastra in gesso rivestito SoundBoard BA13	0,283	294	64 (-1;-6) dB L _{n,w} (C ₁) = 57 (-3) dB
 IG 354385 e IG354387	Solaio laterocemento 16+40 mm Intonaco 15 mm Controsoffitto pendinato sp. 200 mm Airock DD sp. 60 mm 1 lastra in gesso rivestito SoundBoard BA13	0,428	299	67 (-2;-6) dB L _{n,w} (C ₁) = 48 (0) dB

Come descritto ampiamente nel paragrafo 3.4, non è la sola parete di separazione a determinare la quota di suono trasmesso tra un ambiente e quello adiacente, bensì l'intero sistema di elementi che sono connessi alla parete di separazione. Nel caso di partizione verticale, ad esempio, le trasmissioni laterali avvengono attraverso i solai superiore e inferiore e le due pareti laterali.

In generale, la trasmissione del suono per via laterale può essere ridotta intervenendo in diversi modi [25]:

- aumentando la massa degli elementi connessi alla parete di separazione lungo i quali ci possa essere trasmissione laterale del suono;
- introducendo discontinuità, ovvero interruzioni, sul percorso indiretto;
- applicando una controparete fonoisolante all'elemento laterale per incrementarne il potere fonoisolante;
- chiudendo ogni apertura nel muro o nel sistema di condotti tra ambienti adiacenti.

In Figura 4. 19 è riportato un esempio di giunto fra parete leggera e solaio, mentre in Figura 4. 20 è rappresentato un giunto tra due pareti pesanti. Per entrambi i casi è raccomandata la prosecuzione della parete di separazione oltre la linea del giunto, in modo da introdurre discontinuità nel percorso di trasmissione laterale dell'energia sonora.

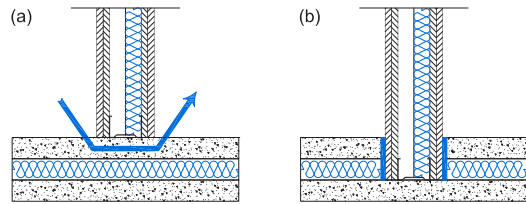


Figura 4. 19 - Schema di posa di una parete leggera su solaio: a) soluzione non corretta; b) soluzione raccomandata.

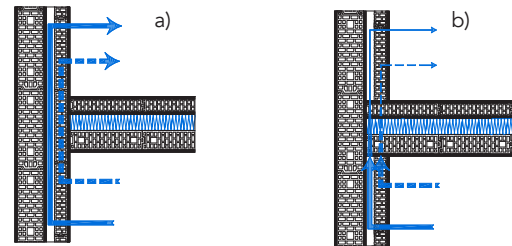


Figura 4. 20 - Schema di una parete divisoria: a) configurazione errata; b) configurazione corretta (tratto da [37]).

Nel caso di edifici esistenti dove sia necessario incrementare il potere fonoisolante delle partizioni è possibile applicare una controparete con interposto strato isolante, un pavimento galleggiante o un controsoffitto (Figura 4. 21).

Il valore dell'incremento dell'indice di valutazione del potere fonoisolante, $\Delta R_{ij,w}$, in decibel, di cui alla (3.15), dovrebbe essere fornito da misurazioni effettuate in laboratorio. In mancanza di tali dati, è possibile effettuare un calcolo previsionale a partire dalla frequenza di risonanza della struttura costituita dallo strato omogeneo di base e dallo strato addizionale.

Nel caso in cui uno strato resiliente sia fissato direttamente allo strato di base senza montanti o correnti, la frequenza di risonanza è stimabile prendendo in considerazione separatamente i valori delle masse per unità di area della struttura di base e dello strato addizionale, mediante la formula:

$$f_0 = 160 \sqrt{s' \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \text{ Hz}, \quad (4.7)$$

dove s' è la rigidità dinamica dello strato resiliente, in Meganewton per metro cubo, m_1' è la massa per unità di area, in chilogrammi per metro quadrato, della struttura di base (il muro per partizioni verticali, il solaio per partizioni orizzontali) e m_2' è la massa per unità di area dello strato addizionale (Figura 4. 21).

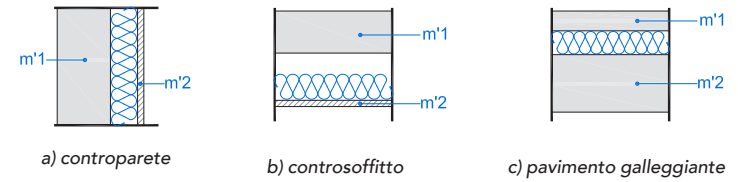


Figura 4. 21 - Incremento del potere fonoisolante mediante applicazione di uno strato addizionale (m_2') su strato in muratura (m_1'): a) controparete; b) controsoffitto c) pavimento galleggiante.

Nel caso in cui gli strati addizionali non siano collegati direttamente alla struttura di base, bensì realizzati con montanti o correnti, e la cavità sia riempita con materiale poroso avente resistenza al flusso d'aria $r > 5 \text{ kPas/m}^2$, la frequenza di risonanza si calcola mediante la formula:

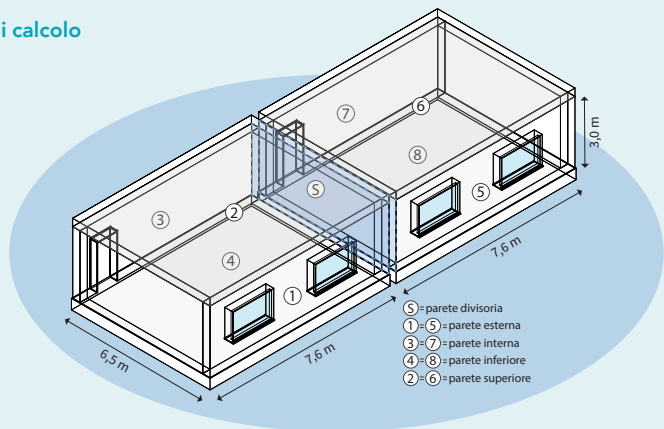
$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{0,111}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \text{ Hz}, \quad (4.8)$$

dove d è lo spessore della cavità, in metri, e gli altri simboli hanno il significato già visto. Nota la frequenza di risonanza della struttura (arrotondata alla frequenza centrale di banda di terzo d'ottava nella quale rientra f_0), dalla Tabella 4. 7 è possibile ottenere il valore dell'incremento dell'indice di valutazione per partizioni (parete o soffitto) con R_w compreso tra 20 e 60 dB. Si fa notare che per frequenze di risonanza minori di 200 Hz, il valore minimo di ΔR_w è 0 dB ma dipende anche dall'indice di valutazione del potere fonoisolante della struttura di base.

Frequenza di risonanza, f_0 (Hz)	ΔR_w (dB)
$30 \leq f_0 \leq 160$	$74,4 - 20 \log(f_0) - R_w/2$
200	-1
250	-3
315	-5
400	-7
500	-9
$630 \leq f_0 \leq 1600$	-10
$1600 \leq f_0 \leq 5000$	-5

Tabella 4. 7 - Valori dell'incremento dell'indice di valutazione del potere fonoisolante mediante un rivestimento, in corrispondenza del valore della frequenza di risonanza della struttura [33].

Esempio di calcolo



Dati di ingresso:

- Area del divisorio, $S = 19,5 \text{ m}^2$;
- Volume dell'ambiente ricevente = Volume dell'ambiente emittente, $V = 148,2 \text{ m}^3$;
- Parete esterna monostrato (1, 5), $m' = 280 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 54,0 \text{ dB}$;
- Parete divisoria monostrato (S), $m' = 280 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 54,0 \text{ dB}$;
- Parete interna (3, 7), $m' = 150 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 42,0 \text{ dB}$;
- Solaio interpiano inferiore e superiore (2, 6, 4, 8), $m' = 340 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 50,0 \text{ dB}$;
- Pavimento galleggiante, massetto in calcestruzzo da 35 mm posato con uno strato di lana minerale con rigidità dinamica $s' = 10 \text{ MN/m}^3$, $m' = 73,5 \text{ kg/m}^2$.

L'indice di valutazione del potere fonoisolante apparente R'_w tra due ambienti si determina secondo la 3.13:

$$R'_w = -10 \cdot \log \left(10^{-\frac{R_{Dd,w}}{10}} + \sum_{f=1}^n 10^{-\frac{R_{Ff,w}}{10}} + \sum_{f=1}^n 10^{-\frac{R_{Df,w}}{10}} + \sum_{f=1}^n 10^{-\frac{R_{Fd,w}}{10}} + \frac{A_0}{S_s} \sum_{j=1}^m 10^{-\frac{D_{nj,w}}{10}} \right) \text{ dB}$$

dove l'indice di valutazione del potere fonoisolante per la trasmissione diretta $R_{Dd,w}$ è pari all'indice di valutazione del potere fonoisolante dell'elemento di separazione dal momento che non sono presenti strati addizionali sul lato emittente/o ricevente dell'elemento di separazione.

I diversi contributi di trasmissione laterale si calcolano con la formula 3.15:

$$R_{ij,w} = \frac{R_{i,w} + R_{j,w}}{2} + \Delta R_{ij,w} + K_{ij} + 10 \log \frac{S_s}{l_o l_{ij}} \text{ dB}$$

Il calcolo dell'incremento ΔR_w , dovuto alla presenza del pavimento galleggiante si basa sul calcolo della frequenza di risonanza secondo la Tabella 4. 7, qui applicata riferendo alle masse per unità di superficie dello strato di base ($m'_1 = 340 \text{ kg/m}^2$) e dello strato di rivestimento ($m'_2 = 73,5 \text{ kg/m}^2$) e della rigidità dinamica dello strato resiliente ($s' = 10 \text{ MN/m}^3$):

$$f_0 = 160 \sqrt{s' \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} = 160 \sqrt{30 \left(\frac{1}{340} + \frac{1}{73,5} \right)} = 65 \text{ Hz}$$

Essendo $30 < f_0 \leq 160 \text{ Hz}$, secondo il prospetto riportato nella UNI EN ISO 12354-1 [33] (vedi Tabella 4. 7) si ha:

$$\Delta R_w = 74,4 - 20 \log(f_0) - R_w / 2 = 13,1 \text{ dB}$$

Il calcolo dell'indice di riduzione delle vibrazioni K_{ij} di tutti i giunti fa riferimento al rapporto logaritmico delle masse per unità di superficie degli elementi interessati, M (cfr. paragrafo.3.4).

I valori di M e i valori di K_{ij} ottenuti dall'indice di riduzione sono riportati nella tabella seguente, insieme ai valori dei poteri fonoisolanti $R_{ij,w}$.

Percorso di trasmissione (Figura. 3.10)	Tipologia di giunto	K_{ij} (dB)	M	R_{ij} (dB)	Calcolo di R_{ij}
S-5=1-S 1-S = Fd	Giunto rigido a T	5,7	0	67,8	$R_{5,5} = \frac{(54+54)}{2} + 0 + 5,7 + 10 \log \left(\frac{19,5}{3,0} \right)$
S-6=2-S 2-S = Fd	Giunto rigido a croce	8,7	0,08	65,5	$R_{5,6} = \frac{(54+50)}{2} + 0 + 8,7 + 10 \log \left(\frac{19,5}{6,5} \right)$
S-7=3-S 3-S = Fd	Giunto rigido a T	6,1	-0,27	62,2	$R_{5,7} = \frac{(54+42)}{2} + 0 + 6,1 + 10 \log \left(\frac{19,5}{3,0} \right)$
S-8=4-S 4-S = Fd	Giunto rigido a T	5,7	0,08	75,6	$R_{5,8} = \frac{(54+50)}{2} + 13,1 + 5,7 + 10 \log \left(\frac{19,5}{6,5} \right)$
1-5	Giunto rigido a T	5,7	0	67,8	$R_{1,5} = \frac{(54+54)}{2} + 0 + 5,7 + 10 \log \left(\frac{19,5}{3,0} \right)$
2-6	Giunto rigido a croce	7,3	-0,08	62,1	$R_{2,6} = \frac{(50+50)}{2} + 0 + 7,3 + 10 \log \left(\frac{19,5}{6,5} \right)$
3-7	Giunto rigido a T	9,9	0,27	60,1	$R_{3,7} = \frac{(42+42)}{2} + 0 + 9,9 + 10 \log \left(\frac{19,5}{3,0} \right)$
4-8	Giunto rigido a T	4,6	0,08	73,0	$R_{4,8} = \frac{(50+50)}{2} + \left(13,1 + \frac{13,1}{2} \right) + 4,6 + 10 \log \left(\frac{19,5}{6,5} \right)$

** Se lungo il percorso ij si trovano due strati addizionali si somma il valore maggiore con la metà del minore ($\Delta R_{ij,w} = \Delta R_{i,w} + \Delta R_{j,w}/2$, con $\Delta R_{j,w} < \Delta R_{i,w}$)

Nel presente esempio di calcolo, l'ultimo fattore contenuto nella formula dell'indice di valutazione del potere fonoisolante della partizione, che tiene conto trasmissione attraverso un piccolo elemento o un sistema di trasmissione per via aerea, si assume uguale a zero dal momento che non è previsto. Si ottiene pertanto:

$$R'_w = 51,0 \text{ dB}$$

L'indice di valutazione dell'isolamento acustico normalizzato secondo il tempo di riverberazione, si ottiene secondo la (3.17):

$$D_{nT,w} = 50,9 + 10 \log \left(0,16 \cdot \frac{148,2}{0,5 \times 19,5} \right) = 54,9 \text{ dB}$$

Occorre confrontare i risultati ottenuti con i valori stabiliti dalla normativa di riferimento (cfr. Tabella 3.11) in relazione alla tipologia di caso in esame (edilizia scolastica pubblica o privata).

Le porte

Il potere fonoisolante delle porte è determinato dalla combinazione delle prestazioni acustiche del telaio e del pannello sandwich che costituisce la porta. Oltre alla stratigrafia del pannello, le prestazioni acustiche della porta dipendono fortemente dalla qualità della guarnizione lungo il perimetro. Occorre poi ricordare che piccoli dettagli quali le soglie, la presenza di buchi passanti per la serratura o di parti vetrate possono comprometterne le qualità fonoisolanti.

Le porte esterne rappresentano, insieme al serramento vetrato, gli elementi deboli di facciata. Porte a più strati costituiti da lamiera d'acciaio e pannelli di legno, dotate di guarnizioni ermetiche e perfetto accoppiamento tra porta e telaio, possono raggiungere un potere fonoisolante R_w di 40 dB.

Porte interne o esterne in legno, con spessori variabili da 44 mm a 54 mm, e massa per unità di superficie da 27 kg/m² a 29 kg/m², sigillate sul perimetro, possono garantire un potere fonoisolante R_w variabile tra 30 e 35 dB [6]. Nella scelta di porte più pesanti, caratterizzate da maggiore massa, occorre valutare l'incidenza dell'aumento di peso sul telaio e sui cardini, considerando l'utilizzo della porta da parte dei bambini.

In funzione della percentuale di superficie occupata da piccoli elementi deboli, quali porte o finestre è possibile determinare il potere fonoisolante di un divisorio composito (Figura 4. 22). Basandosi sulla differenza tra l'indice del potere fonoisolante della partizione di base e quello della porta e sulla percentuale di superficie totale occupata dalla porta, è possibile ottenere la correzione in dB da aggiungere al potere fonoisolante più basso (per esempio quello della porta) per ottenere il potere fonoisolante medio dell'intero divisorio.

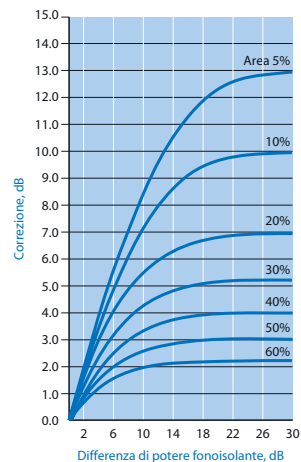


Figura 4. 22 - Valori di correzione da aggiungere all'indice di valutazione del potere fonoisolante degli elementi deboli di una partizione composita, in funzione della differenza tra gli indici di valutazione del potere fonoisolante della parete di base e dell'elemento e della percentuale occupata dall'elemento (tratto da [6]).

Ad esempio, assumendo una parete di un'aula di dimensioni 7 m x 3 m = 21 m², dotata di una porta di dimensioni pari a 1 m x 2 m = 2 m², la percentuale della parete occupata dalla porta è pari a $2/21 \times 100 = 9,5 \%$.

Se il muro è caratterizzato da un potere fonoisolante R_w di 45 dB e la porta da un valore pari a 30 dB, la differenza di potere fonoisolante tra il muro e la porta è di 15 dB. Leggendo sul grafico in corrispondenza di tale valore, sulla curva corrispondente a circa il 9 % di superficie occupata dalla porta, si ricava un valore di 9 dB di correzione da aggiungere al potere fonoisolante della porta per ottenere il potere fonoisolante medio della partizione, che risulta quindi pari a 39 dB.

Soluzioni più performanti, da utilizzarsi nei casi di ambienti particolarmente sensibili o rumorosi, come le aule di musica, prevedono l'installazione di porte doppie separate da un'intercapedine resa fonoassorbente mediante installazione di pannelli porosi/fibrosi (Figura 4. 23). Porte doppie forniscono in genere prestazioni di fonoisolamento comprese tra i 45 dB e i 60 dB.

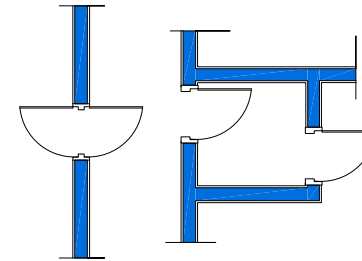


Figura 4. 23 - Schema di porta doppia con intercapedine (a) e porta doppia (b).

4.3.3 L'isolamento acustico dal rumore da calpestio

La UNI 11367, richiamata dai CAM, ed il DPCM 5/12/1997 costituiscono i riferimenti normativi per l'isolamento acustico dal rumore di calpestio per gli edifici scolastici. Essi definiscono il requisito in questione in termini di indice di livello di pressione sonora di calpestio normalizzato fra ambienti, L'_{nw} . La UNI 11367 pur distinguendo il requisito prestazionale per ambienti di differenti unità immobiliari ed ambienti sovrapposti della stessa unità immobiliare, stabilisce per entrambi i medesimi valori di riferimento. Il requisito prestazionale, nel DPCM 5/12/1997 invece, non è esplicitamente riferito a solai posti tra due diverse unità immobiliari, si può dunque applicare anche tra due aule o tra due ambienti scolastici (vedi paragrafo 3.5). A parità di massa superficiale, i solai in laterocemento hanno un miglior comportamento ai rumori impattivi alle basse frequenze rispetto a quelli omogenei in cemento armato. L'attenuazione del rumore di calpestio si può conseguire realizzando un pavimento galleggiante o rivestendo il solaio con un pavimento resiliente.

Il pavimento galleggiante è costituito da un pacchetto che si appoggia sul solaio portante (o sul massetto alleggerito di livellamento a copertura degli impianti) che si compone, a partire dal solaio, da uno strato di materiale elastico sul quale si sovrappone una piastra costituita dal massetto tradizionale in calcestruzzo (densità pari a 2500 kg/m³, spessore circa 5-6 cm), sulla quale viene applicata la pavimentazione. Il massetto e il pavimento sono realizzati in modo da "galleggiare" sul solaio portante tramite lo strato elastico, escludendo ogni collegamento rigido con il solaio. Il pavimento resiliente consiste nella posa in opera di una pavimentazione resiliente, come ad esempio le pavimentazioni in gomma o in moquettes, anche direttamente applicata sul solaio. Quest'ultima soluzione è attualmente scarsamente usata.

Le prestazioni dei sottofondi elastici dei pavimenti galleggianti e dei pavimenti resilienti sono espresse in termini di riduzione del livello di pressione sonora di calpestio, ΔL , grandezza misurata in laboratorio con procedure normalizzate secondo la norma UNI EN ISO 10140-3 [38] e il conseguente indice di attenuazione ΔL_w misurato in opera secondo la norma UNI EN ISO 16283-2 [39] e determinato in base alla UNI EN ISO 717-2 [21] su solai massivi (ad esempio solai in calcestruzzo o latero-cemento).

Per i pavimenti galleggianti l'indice ΔL_w è ricavabile a partire dalla massa per unità di superficie del pavimento galleggiante, in chilogrammi per metro quadrato e dalla rigidità dinamica per unità di superficie dello strato resiliente, misurata in Meganewton per metro cubo.

In Tabella 4. 8 sono riportati i valori di rigidità dinamica s' per alcuni materiali utilizzati come sottofondi resilienti per pavimenti galleggianti [40].

Il grafico in Figura 4. 24 riporta invece il valore di ΔL_w per pavimenti galleggianti con massetti di diversa massa per unità di superficie, in funzione della rigidità dinamica dello strato resiliente.

Tabella 4. 8 - Valori di rigidità dinamica per alcune tipologie di sottofondo resiliente (tratta da [40]).

Tipologia di pavimentazione	Rigidità dinamica (MN/m ³)
Membrana bituminosa di spessore 1.5 mm accoppiata ad un tessuto non tessuto elastico in fibra poliestere di spessore 5 mm	22,3
Feltro ad alta grammatura, con una faccia impregnata a saturazione parziale da una speciale miscela bituminosa e rifinita con tessuto polipropilenico, dello spessore totale di 2.8 mm	35,4
Pannello in lana di roccia ROCKWOOL ad alta densità dello spessore di 20 mm	14,0

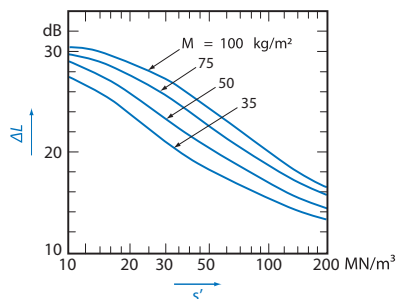


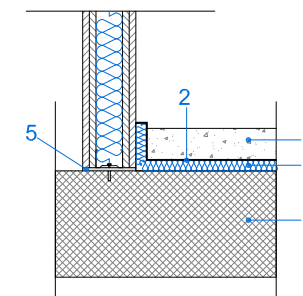
Figura 4. 24 - ΔL ottenuta con pavimenti galleggianti di diversa massa per unità di superficie M , in funzione della rigidità dinamica dello strato resiliente (tratto da [41]).

Sono molti i fattori che possono avere influenza sulla prestazione in opera di un pavimento galleggiante, ed alcuni sono determinanti al fine di ottenere i risultati attesi: la buona realizzazione dei giunti tra elementi orizzontali e verticali, la posa del massetto alleggerito e del massetto ripartitore, la posa dello strato resiliente, del pavimento e del battiscopa.

Per una corretta posa in opera di un pavimento galleggiante è necessario verificare che il massetto di livellamento a copertura degli impianti sia privo di asperità superficiali e che il sottofondo sia posato in modo da non presentare discontinuità o buchi. I sottofondi resilienti devono essere risvoltati lungo le pareti laterali ed i pilastri, facendo in modo che, in corrispondenza degli spigoli, formino un angolo retto tra piano orizzontale e verticale, così da evitare la formazione di ponti acustici dovuti a fessure tra sottofondo e solaio. Le piastrelle in ceramica devono essere posate in modo da evitare il contatto rigido con le pareti laterali, interponendo fasce di materiale resiliente risvoltate lungo le pareti perimetrali degli ambienti e rifilate solo dopo la completa realizzazione del pavimento. Per la posa del battiscopa, al fine di evitare il collegamento rigido tra quest'ultimo e il pavimento, è necessario applicare una striscia di materiale resiliente. A finiture terminate la striscia desolidarizzante può anche essere rimossa lasciando una fessura d'aria minima (0.3 mm), che disaccoppia le strutture senza creare problemi di inestetismi o di accumulo di sporcizia. In Figura 4. 25 è riportato un esempio di corretta posa del sottofondo resiliente. In Figura 4. 26 e Figura 4. 27 sono riportati due esempi di realizzazione di pavimento galleggiante.

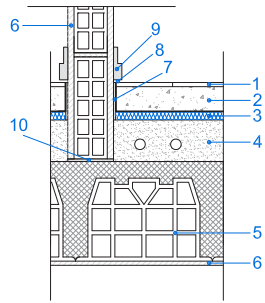


Figura 4. 25 - Esempio di posa di sottofondo resiliente con risvolto sulle pareti verticali.



1. Massetto sabbia-cemento ($\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$) + rete elettrosaldata ($s=8 \text{ cm}$)
2. Telo di nylon
3. Sottofondo resiliente
4. Soletta strutturale in cemento armato ($\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$, $s=36 \text{ cm}$)
5. Striscia di desolidarizzazione

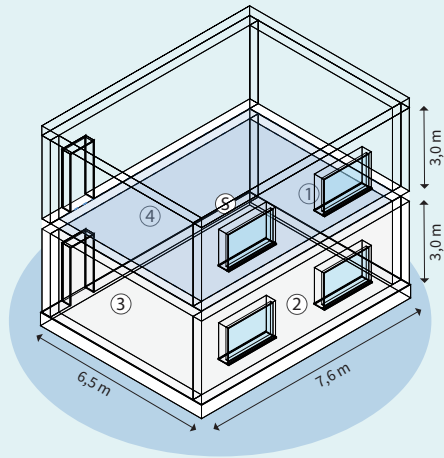
Figura 4. 26 - Esempio di realizzazione di pavimento galleggiante su soletta in cemento armato con parete verticale leggera.



1. Pavimento in ceramica
2. Massetto sabbia-cemento ($\rho = 1817 \text{ kg/m}^3$) + rete elettrosaldata ($s=6 \text{ cm}$)
3. Sottofondo resiliente
4. Calcestruzzo alleggerito con inerti di polistirolo ($s=7 \text{ cm}$)
5. Soletta strutturale in latero-cemento ($s=20+5 \text{ cm}$)
6. Intonaco di calce e cemento ($s=1 \text{ cm}$)
7. Polietilene espanso ($s=5 \text{ mm}$)
8. Fessura per evitare collegamenti rigidi
9. Battiscopa
10. Striscia di desolidarizzazione

Figura 4.27 - Esempio di realizzazione di pavimento galleggiante su soletta in laterocemento con parete verticale in muratura.

Esempio di calcolo



Dati di ingresso:

- Solaio in laterocemento, $m' = 340 \text{ kg/m}^2$, area $S = 7,60 \text{ m} \times 6,50 \text{ m} = 49,4 \text{ m}^2$, $R_w = 53,0 \text{ dB}$;
- Pavimento galleggiante, massetto in calcestruzzo da 35 mm posato con uno strato di lana minerale con rigidità dinamica $s' = 10 \text{ MN/m}^3$, $m' = 73,5 \text{ kg/m}^2$;
- Parete esterna 1, $m' = 330 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 52,0 \text{ dB}$;
- Parete esterna 2, $m' = 280 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 50,0 \text{ dB}$;
- Parete interna 3, $m' = 280 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 50,0 \text{ dB}$;
- Parete interna 4, $m' = 180 \text{ kg/m}^2$, $R_w = 40,0 \text{ dB}$.

L'indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato rispetto all'assorbimento acustico, $L'_{n,w}$ fra ambienti sovrapposti si determina mediante la relazione (3.23):

$$L'_{n,w} = 10 \log \left(10^{-\frac{L_{n,d,w}}{10}} + \sum_{j=1}^n 10^{-\frac{L_{n,j,w}}{10}} \right) \text{ dB,}$$

dove il livello di pressione sonora di calpestio normalizzato rispetto all'assorbimento acustico per il percorso diretto $L_{n,d,w}$ è calcolato con la formula (3.25):

$$L'_{n,d,w} = L_{n,eq,0,w} - \Delta L_w - \Delta L_{d,w} \text{ dB,}$$

Il calcolo dell'indice di valutazione livello di pressione sonora di calpestio normalizzato rispetto all'assorbimento acustico equivalente del solo pavimento, $L_{n,eq,0,w}$ per pavimenti omogenei è determinato con la seguente relazione:

$$L_{n,eq,0,w} = 164 - \left[35 \log \frac{m'}{(1 \text{ kg/m}^2)} \right] = 164 - \left[35 \log \frac{340}{(1 \text{ kg/m}^2)} \right] = 75,4 \text{ dB}$$

L'indice di valutazione dell'attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio, ΔL_w per la tipologia di pavimentazione in esame è calcolato mediante la formula (3.30):

$$\Delta L_w = [13 \log(m')] - [14,2 \log(s')] + 20,8 = [13 \log(73,5)] - [14,2 \log(10)] + 20,8 = 30,9 \text{ dB}$$

L'indice $\Delta L_{d,w}$ si assume uguale a zero dal momento che non è previsto alcuno strato ulteriore sul lato ricevente della partizione in esame, ad esempio un controsoffitto. Sostituendo nella formula per il calcolo del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato rispetto all'assorbimento acustico per il percorso diretto, si ottiene:

$$L'_{n,d,d,w} = 44,5 \text{ dB}$$

I diversi contributi di trasmissione laterale si calcolano con la formula 3.26:

$$L_{n,j,w} = L_{n,eq,0,w} - \Delta L_w + \frac{R_{i,w} + R_{j,w}}{2} - \Delta R_{j,w} - K_{ij} - 10 \cdot \log \frac{S_i}{I_0 I_j} \text{ dB,}$$

Il calcolo dell'indice di riduzione delle vibrazioni K_{ij} di tutti i giunti fa riferimento al rapporto logaritmico delle masse per unità di superficie degli elementi interessati, M (paragrafo.3.4). I valori di M e i valori di K_{ij} ottenuti dall'indice di riduzione sono riportati nella tabella seguente, insieme ai valori dei poteri fonoisolanti $R_{ij,w}$.

Percorso di trasmissione	Tipologia di giunto	K_{ij} (dB)	M	$L_{n,ij,w}$ (dB)	Calcolo di $L_{n,ij,w}$
Df1	Giunto rigido a T	5,7	0,01	31,5	$L_{n,Df1,w} = 75,4 - 30,9 - \frac{(55-52)}{2} + 0,5 \cdot 7 - 10 \log \left(\frac{49,4}{6,5} \right)$
Df2	Giunto rigido a T	5,7	0,08	31,2	$L_{n,Df2,w} = 75,4 - 30,9 - \frac{(55-54)}{2} + 0,5 \cdot 7 - 10 \log \left(\frac{49,4}{7,6} \right)$
Df3	Giunto rigido a croce	8,7	0,08	29,5	$L_{n,Df3,w} = 75,4 - 30,9 - \frac{(55-50)}{2} + 0,8 \cdot 7 - 10 \log \left(\frac{49,4}{6,5} \right)$
Df4	Giunto rigido a croce	9,4	0,36	33,5	$L_{n,Df4,w} = 75,4 - 30,9 - \frac{(55-42)}{2} + 0,9 \cdot 4 - 10 \log \left(\frac{49,4}{7,6} \right)$

Sostituendo nella formula per il calcolo dell'indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato rispetto all'assorbimento acustico, $L'_{n,w}$ si ottiene infine:

$$L'_{n,w} = 45,3 \text{ dB}$$

Il valore ottenuto dall'indice $L'_{n,w}$ è il valore da confrontare con i limiti normativi (cfr. Tabella 3.12).

4.3.4 La correzione dei ponti acustici

Al fine di ottenere un adeguato isolamento acustico di un edificio è importante correggere i ponti acustici causati da elementi deboli o da errori di progettazione. Il disegno in Figura 4. 28 indica alcuni percorsi di trasmissione del suono in un edificio e gli interventi di prevenzione.

In particolare, è necessario ricordare alcune regole di base per ottimizzare gli interventi di isolamento acustico:

- porte e serramenti, bocchette di aerazione, etc. ridurranno le prestazioni delle partizioni su cui sono installate;
- i rumori da impatto si propagheranno con minima attenuazione attraverso elementi rigidi;
- Le partizioni fra ambienti sensibili dovrebbero continuare oltre il controsoffitto fino al solaio strutturale al fine di prevenire il passaggio del rumore attraverso lo spazio sovrastante la partizione.
- le aperture nei muri dovute al passaggio di impianti elettrici o di altro genere dovrebbero essere ben sigillate e opportunamente sfalsate (vedi Figura 4. 29 e Figura 4. 30);
- canalizzazioni che passano attraverso ambienti sensibili al rumore dovrebbero essere accuratamente rivestite da strati fonoisolanti per evitare il *cross-talk* (vedi paragrafo 4.4 e Figura 4. 30);
- è necessario evitare collegamenti rigidi fra gli strati di una parete doppia (vedi Figura 4. 31).

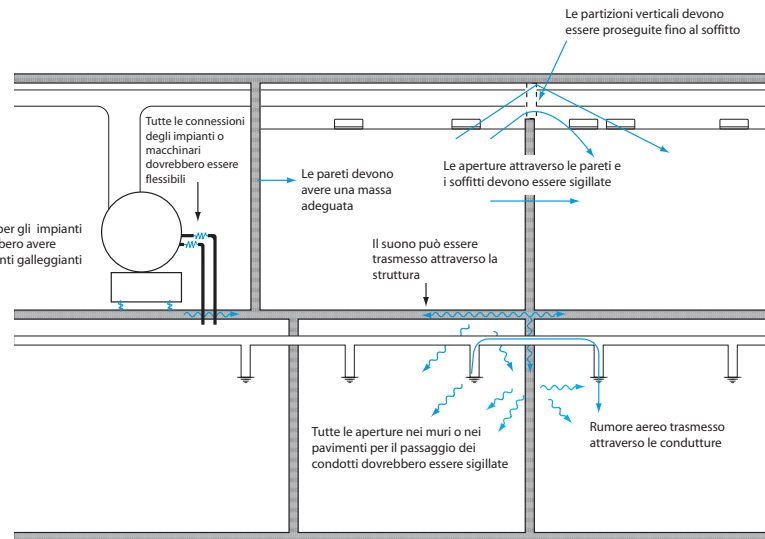


Figura 4. 28 - Percorsi di trasmissione del suono in un edificio e interventi di prevenzione.

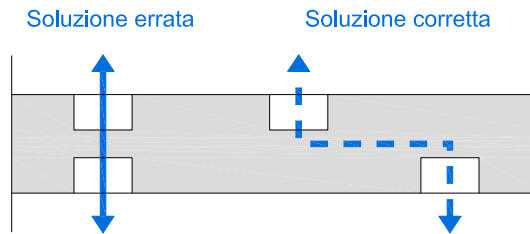


Figura 4. 29 - Schema di collocazione di scatole da incasso per impianti elettrici [37].

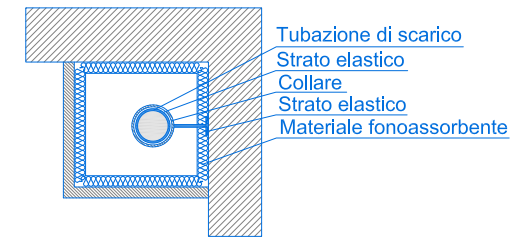


Figura 4. 30 - Schema di realizzazione di un cavedio insonorizzato [37].

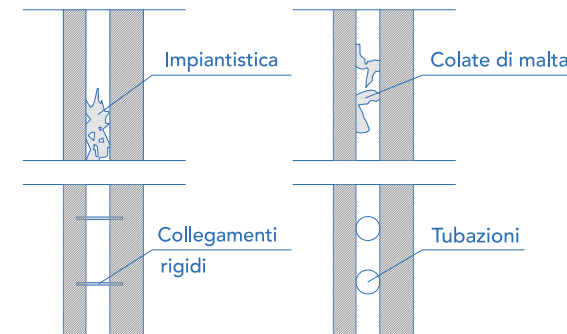


Figura 4. 31 - Tipici errori costruttivi da evitare nella realizzazione di pareti divisorie multistrato [37].

4.4 IL CONTROLLO DEL RUMORE DEGLI IMPIANTI

Il controllo del rumore degli impianti entra nelle fasi preliminari del progetto dell'edificio scolastico in modo più o meno importante in funzione della tipologia di impianto e della sua dislocazione nell'edificio. Al tipo di impianto sono strettamente connesse strategie di progettazione volte alla riduzione della rumorosità immessa dalle macchine e dalla rete di distribuzione. Una razionale dislocazione degli spazi può ridurre il rischio di disturbo da rumore ponendo gli ambienti sensibili, come le aule scolastiche, lontane dalle zone dell'edificio destinate alle centrali impiantistiche.

Ai fini della previsione degli interventi di attenuazione si distinguono gli impianti di climatizzazione, per i quali si considera sia la trasmissione per via aerea che per via solida, dagli altri tipi di impianti, come ad esempio quelli idrosanitari e meccanici (ascensori), per i quali è prevalente la trasmissione per via solida. Tra le diverse tipologie di impianto, quelli di climatizzazione ad aria determinano i più elevati livelli di pressione sonora.

Impianti di climatizzazione

Gli impianti di climatizzazione controllano le condizioni termiche, igrometriche, di movimento e di qualità dell'aria all'interno degli ambienti, sia in condizioni invernali che estive. Sono costituiti, tipicamente, da una centrale termica (o frigorifera, con eventuali torri di raffreddamento), da un sistema di circolazione dell'acqua calda/refrigerata, da un sistema di trattamento e distribuzione dell'aria e da eventuali unità locali [42].

Tra le sorgenti di rumore, i ventilatori per la movimentazione dell'aria rappresentano la sorgente più rilevante dal punto di vista delle potenze sonore prodotte e trasmesse attraverso la rete di condotti. Oltre al ventilatore possono costituire delle sorgenti di rumore secondarie i tratti rettilinei dei condotti, le curve, le diramazioni, le strozzature, le serrande, ecc. Particolarmente critici sono i terminali, cioè le bocchette e i diffusori, in quanto irradiano direttamente in ambiente [13].

Tutti questi componenti si possono considerare come sorgenti di rumore, a causa delle turbolenze dell'aria, e come attenuatori del rumore. Al fine di determinare il livello di pressione sonora generato negli ambienti dalla trasmissione per via aerea lungo i condotti, è necessario quindi eseguire un bilancio tra i due effetti [43].

In generale, per ridurre il livello di rumore generato dai ventilatori, sono da preferire limitate velocità di rotazione delle pale, grandi diametri delle pale e il posizionamento dei ventilatori lontano da irregolarità del condotto. Per le sorgenti secondarie è opportuno limitare la velocità dell'aria lungo il condotto, prevedere curve raccordate ed evitare strozzature troppo accentuate.

Qualora sia presente un eccessivo livello sonoro in ambiente è necessario prevedere dei silenziatori da applicare lungo i condotti, realizzati con materiale fonoassorbente, nella maggior parte dei casi installati a valle del ventilatore. L'attenuazione acustica per unità di lunghezza, maggiore soprattutto alle medie frequenze, è proporzionale al coefficiente di assorbimento acustico del rivestimento ed al rapporto P/S , dove P è il perimetro del rivestimento ed S è l'area della sezione libera del condotto [13]. Nel caso di condotti rettangolari, per ottenere la massima attenuazione si deve ricorrere ad un condotto la cui larghezza sia di molto inferiore all'altezza.

Un'attenuazione, anche se modesta, è ottenibile tramite l'adozione di bocchette acustiche, che però sono di solito previste per ridurre la rumorosità verso l'esterno.

Una ulteriore fonte di rumore disturbante è la trasmissione laterale attraverso i condotti, che si riduce incrementando il potere fonoisolante del condotto stesso, ad esempio applicando un rivestimento esterno e una fasciatura con massa per unità di superficie superiore a 10 kg/m^2 . Per ridurre le trasmissioni per via solida si devono adottare supporti antivibranti, connessioni elastiche e interposizione di materiali resilienti.

Una criticità nel controllo del rumore degli impianti è rappresentata dalla possibilità che i vari condotti dell'aria possano creare ponti acustici tra gli ambienti. Al fine di evitare questo inconveniente, è necessario studiare attentamente il percorso dei condotti in modo che essi non attraversino in serie gli ambienti, prolungando il percorso dei canali che entrano ed escono negli ambienti e creando punti di snodo in ambienti meno sensibili, ad esempio negli spazi di circolazione (Figura 4. 32).

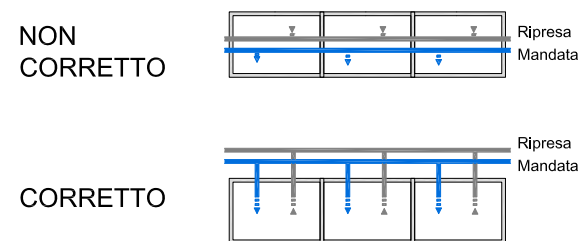


Figura 4. 32 - Schemi di percorso di condotti di aerazione a confronto (tratto da [44]).

Se in ambiente sono presenti delle unità locali, come i ventilconvettori, la sorgente principale del rumore è il ventilatore. Per minimizzare il disturbo da rumore, anche in questo caso è necessario ridurre la velocità di rotazione della girante del ventilatore e applicare dei silenziatori (anche se di modesta efficacia) sulle sezioni di aspirazione e mandata dell'aria, nonché utilizzare supporti antivibranti per ridurre le trasmissioni per via solida.

Tra i componenti dell'impianto di climatizzazione la centrale termica porta a rischi di rumore limitati. Le principali sorgenti sono il bruciatore, la caldaia e la canna fumaria. Gli interventi di insonorizzazione riguardano essenzialmente il bruciatore, per il quale è prevista l'insonorizzazione tramite l'applicazione di una "cuffia". Per le eventuali risonanze nelle canne fumarie di caldaie di grande taglia è consigliabile l'adozione di silenziatori.

Per quanto riguarda i gruppi frigoriferi, si possono dividere in due tipologie: quelli raffreddati ad acqua, installati in locali chiusi, a cui sono spesso accoppiate torri di raffreddamento per la dissipazione del calore in atmosfera, e quelli raffreddati ad aria, che si trovano spesso sulla copertura dell'edificio. Per entrambi la sorgente principale di rumore è il compressore, alla quale si aggiunge il ventilatore per i gruppi frigo raffreddati ad aria. È opportuno, oltre a scegliere macchine silenziose, adottare supporti antivibranti e garantire un adeguato fonoisolamento, senza determinare elevate perdite di carico per i gruppi raffreddati ad aria. Per le torri di raffreddamento la sorgente di rumore principale è il ventilatore e valgono gli accorgimenti dei gruppi frigo raffreddati ad aria.

Se è prevista la disposizione di griglie all'esterno dell'edificio per la ripresa e l'espulsione dell'aria o di sorgenti sonore che emettono nell'ambiente esterno, queste costituiscono sorgenti sonore fisse la cui rumorosità deve essere controllata. Per tali sorgenti è necessario prevedere una valutazione di livello di pressione sonora di emissione e di immissione ai sensi del D.P.C.M. 14/11/97. Sia i valori limite di emissione che i valori di immissione fanno riferimento alle classi di destinazione d'uso del territorio definite all'interno dei piani di classificazione acustica dei Comuni (vedi anche capitolo 2.2). Il livello sonoro limite di emissione è relativo alle singole sorgenti sonore fisse, rilevato in corrispondenza degli spazi utilizzati da persone e comunità (in prossimità della sorgente sonora stessa), mentre il livello sonoro limite di immissione è riferito al rumore immesso nell'ambiente esterno dall'insieme di tutte le sorgenti, misurato in prossimità dei ricettori. Il rumore che si origina dalla rete idraulica, che consiste nel sistema di tubazioni che porta l'acqua calda e/o refrigerata ai terminali d'impianto, nella quale sono compresi anche i radiatori e i pannelli radianti, è quasi sempre generato da pompe che inducono la circolazione forzata. Il disturbo acustico aereo è quasi sempre limitato, mentre per limitare quello strutturale è opportuno adottare connettori flessibili e supporti antivibranti. Per le tubazioni, che possono considerarsi sorgenti secondarie, occorre ridurre la velocità dell'acqua, adottare supporti elastici e rivestimenti resilienti. Il corretto dimensionamento delle valvole ridurrà rumori di cavitazione, vibrazioni e fischi.

Impianti idrosanitari

Gli impianti idrosanitari possono costituire sorgenti di rumore rilevanti. Il rumore emesso dalle tubazioni è prodotto sia dalle vibrazioni trasmesse direttamente alle pareti, attraverso i condotti, sia dalle turbolenze del fluido che in esse scorre. Nella realizzazione degli impianti idrosanitari devono essere adottate tutte le cautele suggerite dalla regola dell'arte con riferimento al dimensionamento e posa delle tubazioni di adduzione dell'acqua calda e fredda, della rete di scarico, dei miscelatori, ecc., al fine di limitare la generazione di rumore da parte di fenomeni di turbolenza nelle curve, di cavitazione nelle sezioni ristrette, di colpo d'ariete nei transitori, e la propagazione per via solida attraverso le strutture [43]. Per limitare la rumorosità di questi impianti valgono le indicazioni riportate nel paragrafo precedente sul controllo del rumore della rete idraulica dell'impianto di climatizzazione.

Ascensori

Tra le due tipologie di ascensori esistenti sul mercato, idraulici e a fune, i primi determinano una minore emissione sonora, dovuta essenzialmente alla presenza del compressore del motore, che può comunque essere posto in un apposito locale ed isolato nei confronti della trasmissione per via solida.

Gli ascensori del tipo a fune sono maggiormente rumorosi. Per gli ascensori provvisti di locale macchine si può ipotizzare un livello di pressione sonora dell'organo dell'ordine di 70 dB(A) a 1 metro, in campo libero. All'interno del locale macchine sono quindi attesi livelli di rumore mediamente più elevati, ma prevedendo la realizzazione di pareti spesse in laterizio e l'uso di porte ad elevato isolamento acustico si ritiene che tale impianto potrebbe non essere critico. Al fine di evitare la generazione di fenomeni vibro-acustici si devono prevedere basamenti inerziali e idonei supporti antivibranti. Per gli ascensori privi di locale macchina sono sufficienti organi più piccoli e compatti che però possono dare origine a livelli di rumore piuttosto elevati. In tali tipi di ascensori potrebbe essere particolarmente critico il problema della trasmissione delle vibrazioni alle strutture. A questo proposito sarà quindi importante prevedere elementi resilienti in corrispondenza del fissaggio delle vie di corsa. Infine, dovrà essere prestata attenzione anche ai dispositivi di apertura e di chiusura delle porte al piano.

Riferimenti bibliografici

1. DPCM del 14/11/97 "Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore".
2. Norma Italiana UNI 11367:2010. Acustica in edilizia - Classificazione acustica delle unità immobiliari - Procedura di valutazione e verifica in opera.
3. Norma Italiana UNI 11532-2:2020. Acustica – Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati – Metodi di programmazione e tecniche di valutazione. Settore scolastico.
4. DM 11/10/2017 "Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici per la gestione dei cantieri della pubblica amministrazione".
5. D.P.C.M. 05/12/1997 "Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici".
6. Department for Education, Acoustic Design of School: a design guide. London, 2015 (<http://ioa.org.uk>).
7. Legge Quadro sull'inquinamento acustico n. 447 del 26/10/1995.
8. Legge regionale 20 ottobre 2000, n. 52 "Disposizioni per la tutela dell'ambiente in materia di inquinamento acustico".
9. Delibera della Giunta Regionale del 14/02/05, n. 46-14762, Regione Piemonte.
10. Decreto 16/03/1998 "Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico" del Ministero dell'Ambiente.
11. British Standard BS 8233:1999. Sound insulation and noise reduction for buildings – Code of practice.
12. Norma Italiana UNI EN 1793-3:2009. Dispositivi per la riduzione del rumore da traffico stradale - Metodo di prova per la determinazione della prestazione acustica - Spettro normalizzato del rumore da traffico.
13. Sharland I., Manuale di Acustica applicata. L'attenuazione del rumore, Ed. Wood Italiana, 1994.
14. Norma Italiana UNI ISO 9613-1:2006. Acustica - Attenuazione sonora nella propagazione all'aperto - Calcolo dell'assorbimento atmosferico.
15. Norma Italiana UNI ISO 9613-2:2006. Acustica - Attenuazione sonora nella propagazione all'aperto - Metodo generale di calcolo.
16. Brambilla G., "Sorgenti di rumore negli ambienti di vita" e "Modelli matematici predittivi del rumore", in Manuale di acustica applicata, Città Studi, novembre 2007, ISBN: 978825173208.
17. Picard M. e Bradley J. S., "Revisiting Speech Interference in Classrooms", *Audiology* 40, 221-244, 2001.
18. Norma Italiana UNI EN ISO 12354-3:2017. Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti. Isolamento acustico contro il rumore proveniente dall'esterno per via aerea.
19. Norma Italiana UNI 11296:2008. Acustica in edilizia – Posa in opera di serramenti e altri componenti di facciata – Criteri finalizzati all'ottimizzazione dell'isolamento acustico di facciata dal rumore esterno.
20. Norma Italiana UNI EN ISO 717-1:2021. Acustica - Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Isolamento acustico per via aerea.
21. Norma Italiana UNI EN ISO 717-2:2021. Acustica - Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Isolamento dal rumore di calpestio.
22. Norma Italiana UNI EN ISO 10140-2:2010. Acustica - Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio - Misurazione dell'isolamento acustico per via aerea.
23. Norma Italiana UNI EN ISO 16283-1:2018. Acustica - Misure in opera dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Isolamento acustico per via aerea.
24. Norma Italiana UNI EN ISO 10140-1:2016. Acustica - Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio - Regole di applicazione per prodotti particolari.
25. Brosio E. e Brosio P., "Metodi empirici per la previsione del potere fonoisolante e dell'attenuazione del rumore di calpestio", in Manuale di acustica applicata, Città Studi, novembre 2007, ISBN: 978825173208.
26. Norma Italiana UNI 7697:2014. Criteri di sicurezza nelle applicazioni vetrarie.
27. D. Lgs. 6 settembre 2005, n. 206 "Codice del consumo, a norma dell'art. 7 della legge 29 luglio 2003, n. 229".
28. Norma Italiana UNI EN 12207:2017. Finestre e porte - Permeabilità all'aria – Classificazione.
29. Norma Italiana UNI EN 14351-1:2016. Finestre e porte - Norma di prodotto, caratteristiche prestazionali. Finestre e porte esterne pedonali.

30. Decreto Ministeriale 18 Dicembre 1975 "Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici minimi di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica".
31. Norma Italiana UNI EN ISO 16283-3:2016. Acustica - Misure in opera dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Isolamento acustico di facciata.
32. Bradley J. S., Sound Insulating against aircraft noise, NRCC-46396, National Research Council Canada, 1998.
33. Norma Italiana UNI EN ISO 12354-1:2017. Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni dei prodotti - Isolamento dal rumore per via aerea tra ambienti.
34. Potere fonoisolante di materiali, componenti e strutture. Banca Dati. IEN Acustica. Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris di Torino (attualmente INRIM, Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica).
35. DIN Standard 4109-1:1989. Sound insulation in buildings; requirements and testing.
36. ROCKWOOL. Prove acustiche (consultato a 01 Maggio 2021).
37. Disponibile all'indirizzo: <https://www.rockwool.it/siteassets/rw-it/brochuremanuali/acustica/prove-acustiche.pdf>
38. Cellai G., Secchi S. e Busa L., "La protezione acustica degli edifici. Soluzioni tecniche e informazioni progettuali per il rispetto del D.P.C.M. 5/12/97". Ed. Alinea Editrice, ISBN 88-8125-972-9, 2005.
39. Norma Italiana UNI EN ISO 10140-3:2015. Acustica - Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico di edifici e di elementi di edificio - Misurazione dell'isolamento del rumore da calpestio.
40. Norma Italiana UNI EN ISO 16283-2:2020. Acustica - Misure in opera dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Isolamento acustico dal rumore di calpestio.
41. Astolfi A., Schiavi A., Griginis A., Geroso S. e Piccablotto G., "Verifica del livello di pressione sonora di calpestio dal laboratorio all'opera: indagini sperimentali e modelli di calcolo", Rivista Italiana di Acustica, Vol. 30, n.3-4 Luglio-Dicembre 2006, 95-114.
42. Benedetto G., Schiavi A. e Spagnolo R., "Trasmissione del suono per via solida", in Manuale di acustica applicata, CittàStudi, novembre 2007, ISBN: 978825173208.
43. Norma Italiana UNI 10339:1995. Impianti aeraulici a fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura.
44. Oliaro P., "Rumore degli impianti tecnologici", in Manuale di acustica applicata, CittàStudi, novembre 2007, ISBN: 978825173208.
45. Classroom acoustics I. A resource for creating learning environments with desirable listening conditions. Pubblicazione del Committee on architectural acoustics of the Acoustical Society of America, 2000.
46. Norma Italiana UNI 11532-2:2020. Acustica - Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati - Metodi di programmazione e tecniche di valutazione. Settore scolastico.
47. Norma Italiana UNI 16032:2005. Acustica - Misurazione del livello di pressione sonora di impianti tecnici in edifici - Metodo tecnico progettuale.

5. Le soluzioni di progetto per il controllo del rumore

In questo capitolo è descritta una procedura per effettuare la correzione acustica di aule scolastiche di diverso ordine e grado e più in generale di ambienti destinati all'ascolto della parola. La correzione acustica si effettua a partire dal calcolo del tempo di riverberazione, parametro correlato alla chiarezza della percezione della parola in un ambiente chiuso. A tal fine sono descritti i materiali fonoassorbenti e sono forniti i coefficienti di assorbimento acustico di alcuni rivestimenti utilizzabili negli ambienti scolastici. Sono fornite inoltre indicazioni sulla loro corretta collocazione finalizzata alla buona ricezione del parlato in tutto l'ambiente e alla eliminazione dei difetti acustici.

Nell'ultima parte del capitolo è riportato un esempio di correzione acustica di un'aula scolastica elementare, dal calcolo di progetto al collaudo in opera dopo l'intervento.

5.1 I MATERIALI E LE SOLUZIONI PER L'ASSORBIMENTO ACUSTICO

L'applicazione di materiali fonoassorbenti negli ambienti chiusi determina la riduzione della coda sonora, l'assorbimento dell'energia di riflessioni tardive e indesiderate e del rumore di fondo. La loro scelta deve essere innanzitutto mirata all'ottenimento del tempo di riverberazione ottimale nelle diverse bande di frequenza, in funzione della destinazione d'uso dell'ambiente.

Ogni materiale o elemento fonoassorbente è caratterizzato da un determinato coefficiente di assorbimento α , pari al rapporto tra l'energia sonora assorbita e quella incidente. Il suo valore varia da 0, quando tutta l'energia viene riflessa, a 1, nel caso opposto, quando tutta l'energia viene assorbita. Esso dipende della frequenza e dell'angolo di incidenza dell'onda sonora.

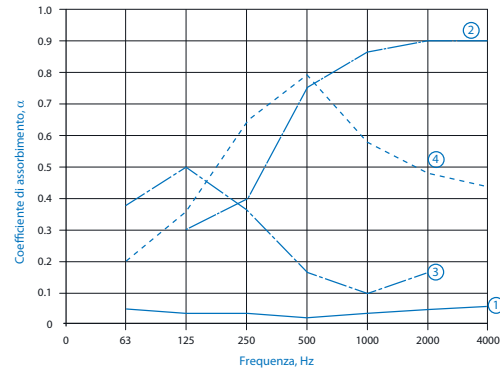
Il coefficiente di assorbimento per incidenza normale si misura in laboratorio con il metodo delle onde stazionarie in tubo, mentre il coefficiente di assorbimento per incidenza casuale, più vicino alle condizioni di utilizzo, si misura in camera riverberante con campioni di grandi dimensioni, in accordo con la norma UNI EN ISO 354 [1]. In questo caso valori superiori a 1 indicano la presenza di un campo sonoro non perfettamente diffuso.

Il principio fisico che regola l'assorbimento sonoro è la conversione di parte dell'energia incidente in calore. Tale conversione avviene con modalità diverse a seconda del materiale e, in relazione alla modalità, risulta maggiormente efficace in diversi intervalli di frequenze.

Le categorie di materiali fonoassorbenti sono le seguenti:

- *Materiali porosi*, che assorbono per porosità;
- *Pannelli vibranti*, che assorbono per risonanza di membrana;
- *Risonatori acustici*, che assorbono per risonanza di cavità.

In Figura 5. 1 sono rappresentate le curve di assorbimento in funzione della frequenza di materiali fonoassorbenti appartenenti alle tre categorie citate, e la curva corrispondente ad un pannello fonoriflettente (n. 1 in Figura 5. 1).



- ① Pannello di gesso rivestito su parete.
- ② Materiale poroso (50 mm fibra minerale, 50 kg/m³); l'assorbimento non viene significativamente diminuito se tale pannello è protetto da un pannello perforato con almeno il 30% di area aperta.
- ③ Pannello vibrante (pannello 9 mm di spessore, 50 mm di intercapedine contenente 25 mm di fibra minerale).
- ④ Pannelli forati / assorbimento per risonanza di cavità (14% di foratura, 25 mm di intercapedine contenente fibra minerale).

Figura 5. 1 - Curva di assorbimento in funzione della frequenza corrispondente ad un pannello fono riflettente (1) e curva corrispondente ad un materiale fonoassorbente poroso (2), ad un pannello vibrante (3) e ad un risonatore acustico (4) [2].

I materiali porosi

I materiali porosi (o fibrosi) sono caratterizzati generalmente da pannelli di lana di roccia o di vetro, schiume di poliuretano espanso a celle aperte, fibre di poliestere, fibre di legno, etc. Sono formati da cavità aperte, di dimensioni inferiori a 1 mm, interconnesse tra di loro. L'assorbimento, a seguito dell'incidenza di un'onda sonora, avviene grazie al movimento delle molecole d'aria all'interno delle cavità e alla successiva perdita di energia a causa dell'attrito con le superfici della cavità stessa.

Tra le proprietà di un materiale poroso, la porosità h_p è pari al rapporto tra il volume occupato dai pori e quello totale del materiale stesso. L'assorbimento cresce all'aumentare della porosità e solitamente la maggiore efficacia fonoassorbente si ha con porosità tra il 90 e il 95% [3].

In prossimità di una parete rigida il maggiore fonoassorbimento si avrà dove la velocità di oscillazione delle particelle è massima. Se consideriamo un'onda stazionaria di lunghezza d'onda l , il primo punto corrispondente al massimo della velocità si troverà ad una distanza dalla parete pari a $d = l/4$. Uno strato fonoassorbente di spessore d assorbirà con efficacia tutte le onde sonore per cui $l < 4d$. Se tra lo strato fonoassorbente e la parete si trova un'intercapedine di spessore d' saranno assorbite con efficacia le onde con $l < 4(d+d')$ (vedi Figura 5. 2).

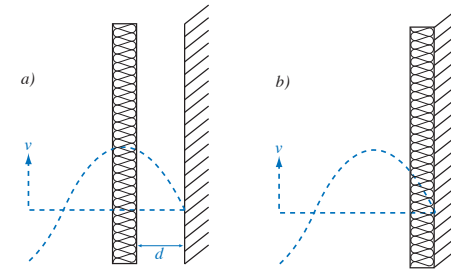


Figura 5. 2 - Maggiore (a) o minore (b) efficienza nell'installazione di materiale fonoassorbente poroso su parete rigida [4].

Applicando queste relazioni, dal legame fra lunghezza d'onda, Δ , frequenza, f , e velocità di propagazione del suono nel mezzo, c , ($c = l \cdot f$), si determina la frequenza minima in corrispondenza della quale il coefficiente di assorbimento assume valori significativi (generalmente superiori a 0,8). Oltre a tale frequenza minima il coefficiente di assorbimento è circa costante. Considerando le distanze di applicazione del materiale fonoassorbente da una parete adottabili nella pratica, risulta che i materiali porosi saranno maggiormente efficaci alle alte frequenze (cui corrispondono le più basse lunghezze d'onda). Tale effetto è rappresentato in Figura 5. 3, dove si riporta il coefficiente di assorbimento di un pannello fonoassorbente fibroso dello spessore di 2,5 cm in funzione della frequenza e della distanza dalla parete. In Figura 5. 4 si riporta invece l'influenza dello spessore sull'assorbimento acustico di un pannello in lana di roccia con densità pari a 60 kg/m³. L'assorbimento acustico migliora sensibilmente alle basse frequenze mentre risulta praticamente inalterato alle alte frequenze.

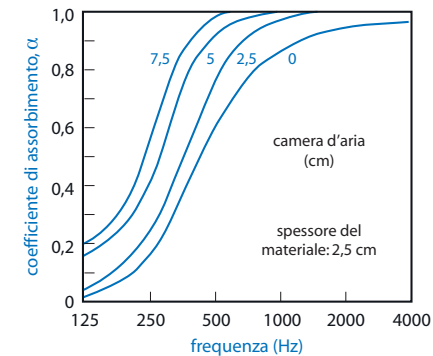


Figura 5. 3 - Coefficiente di assorbimento di un pannello fonoassorbente fibroso dello spessore di 2,5 cm in funzione della frequenza e della distanza dalla parete [5].

I materiali porosi o fibrosi, come feltri o lane di roccia o di vetro, se ricoperti da lamiera forate con diametro dei fori superiore a 3 mm e superficie forata superiore al 30% non riducono in modo rilevante le proprie caratteristiche di fonoassorbimento. Le loro prestazioni sono invece fortemente ridotte da trattamenti superficiali quali la verniciatura o la ricopertura con materiale non poroso.

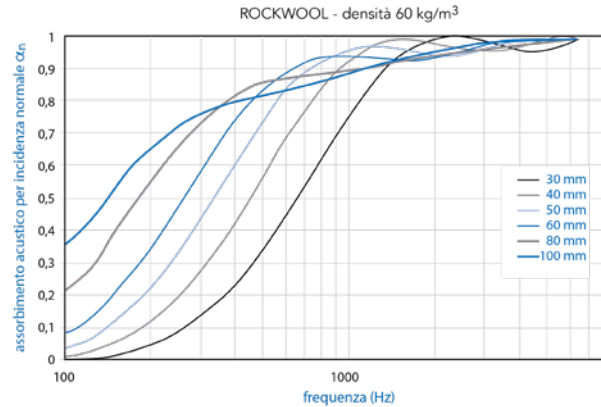


Figura 5. 4 – Influenza dello spessore sull'assorbimento acustico di un pannello in lana di roccia con densità pari a 60 kg/m³ [6].

Frequenza, lunghezza d'onda e velocità di propagazione del suono nell'aria

Il suono è una perturbazione di carattere oscillatorio che si propaga in un mezzo elastico (gassoso, liquido o solido), di frequenza tale da essere percepita dall'orecchio umano (da circa 20 a 20.000 Hz).

La perturbazione induce variazioni di pressione nel mezzo rispetto alla pressione statica, in aria alla pressione atmosferica, che, nonostante assuma valori molto piccoli, viene rilevata dall'orecchio umano.

Oltre alla frequenza, f , misurata in Hertz, che rappresenta il numero di oscillazioni effettuate in un secondo, il suono è descritto dal periodo T , espresso in secondi, e dalla lunghezza d'onda λ , espressa in metri, rispettivamente il tempo e lo spazio richiesti per una oscillazione completa.

Le relazioni che intercorrono fra i suddetti parametri sono le seguenti:

$$f = \frac{1}{T} \quad \lambda = \frac{c}{f} \quad c = \lambda f$$

dove c (m/s) è la velocità del suono nel mezzo. Nel caso dell'aria si può calcolare la velocità del suono in funzione della temperatura con la seguente relazione:

$$c \approx 331,6 + 0,6t$$

dove t è la temperatura espressa in gradi Celsius (°C). Per una temperatura standard di 20 °C, la velocità di propagazione nell'aria assume un valore pari circa 343 m/s.

I pannelli vibranti

I pannelli vibranti sono costituiti da pannelli sottili posti non troppo lontani da una parete rigida (vedi Figura 5. 5). Il comportamento del sistema pannello-aria-parete è assimilabile al moto di una massa vibrante (pannello), collegata con un vincolo elastico (aria contenuta nell'intercapedine) ad un sostegno rigido (parete). La frequenza di risonanza di tale sistema, a cui si ottiene il massimo assorbimento acustico, si determina secondo la seguente relazione:

$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{md}} \quad \text{Hz}, \quad (5.1)$$

dove m è la massa per unità di area del pannello, in chilogrammi al metro quadrato, e d la dimensione dell'intercapedine, in metri.

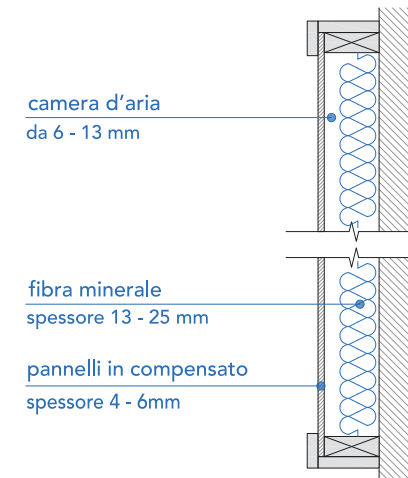


Figura 5. 5 – Tipico pannello vibrante montato a parete [5].

La frequenza di massimo assorbimento è inversamente proporzionale a m e d , per cui diminuisce quando massa e distanza del pannello dalla parete aumentano. I pannelli vibranti, generalmente costituiti da materiale non poroso e caratterizzati da una certa rigidità, come il legno compensato o il gesso rivestito montati su un apposito telaio, presentano un assorbimento selettivo verso le basse frequenze; per i pannelli e le intercapedini usuali la frequenza di risonanza è compresa tra i 50 e i 300 Hz. Il valore dell'assorbimento acustico e la larghezza della banda entro la quale si hanno valori più elevati possono essere aumentati ponendo del materiale poroso a parziale riempimento dell'intercapedine d'aria. In Figura 5. 6 è rappresentato lo spettro di assorbimento di un pannello vibrante di legno compensato dello spessore di 4,8 mm installato a 51 mm di distanza dalla parete con e senza materiale fonoassorbente poroso nell'intercapedine.

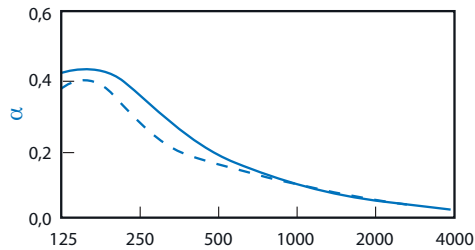


Figura 5.6 - Spettro di assorbimento di un pannello vibrante di legno compensato dello spessore di 4,8 mm installato a 51 mm di distanza dalla parete con e senza materiale fonoassorbente poroso nell'intercapedine. La linea continua si riferisce al pannello con il materiale poroso nell'intercapedine, la linea tratteggiata, senza il materiale poroso nell'intercapedine [4].

I risonatori acustici

I risonatori acustici di Helmholtz sono formati da una cavità con pareti rigide collegata con l'esterno tramite un'apertura stretta, denominata "collo" del risonatore. L'aria contenuta nel collo può essere considerata come una massa vibrante, mentre quella presente nella cavità costituisce l'elemento elastico. Quando un'onda sonora incide sul collo l'aria all'interno dello stesso inizia a vibrare e quella nella cavità viene compressa periodicamente (vedi Figura 5.7). Tale sistema ha una frequenza di risonanza determinabile con la relazione:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V(1+0,8d)}} \text{ Hz}, \quad (5.2)$$

dove c è la velocità del suono nell'aria in metri al secondo, S , l e d sono rispettivamente l'area in metri quadrati, la lunghezza e il diametro, in metri, del collo del risonatore, mentre V è il volume della cavità, in metri cubi.

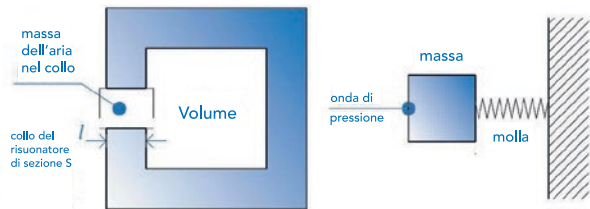


Figura 5.7 - Schema e principio di funzionamento di un risonatore acustico [7].

L'assorbimento di un risonatore è principalmente a bassa frequenza, nell'intervallo tra 50 e 400 Hz, e molto selettivo intorno alla frequenza di risonanza. In Figura 5.8 è rappresentato l'andamento tipico del coefficiente di assorbimento associato ad un risonatore di Helmholtz vuoto o con materiale fonoassorbente nella cavità. Con il materiale poroso nella cavità il valore del coefficiente di assorbimento decresce alla frequenza di risonanza, ma si allarga l'intervallo di frequenze interessate dall'assorbimento acustico.

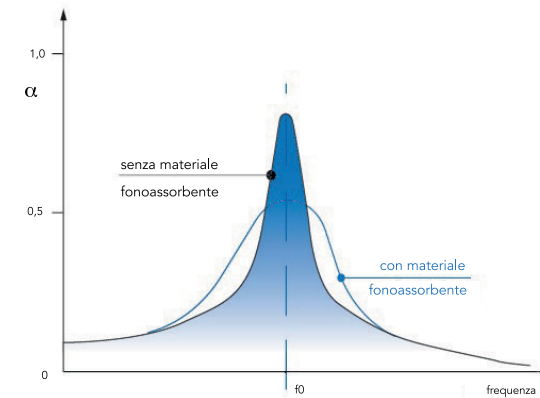


Figura 5.8 - Andamento in frequenza del coefficiente di assorbimento acustico α dei risonatori con o senza l'aggiunta di materiale fonoassorbente poroso all'interno della cavità [3].

Un pannello forato montato ad una certa distanza da una parete rigida si comporta come un insieme di risonatori di Helmholtz, ciascuno costituito da un collo, corrispondente al foro del pannello, e da una cavità, costituita dalla parte di volume tra pannello e parete in corrispondenza del foro (vedi Figura 5.9). La frequenza di risonanza dei pannelli forati risonanti è direttamente proporzionale alla percentuale di foratura ed è inversamente proporzionale allo spessore del pannello e alla distanza dal muro, e si ottiene approssimativamente dalla seguente relazione:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{p}{Dh}} \text{ Hz}, \quad (5.3)$$

dove:

c è la velocità del suono nell'aria;

p è la percentuale di foratura, pari al rapporto fra l'area complessiva dei fori e l'area del pannello;

D è la distanza fra pannello e parete in metri (cioè lo spessore complessivo dell'eventuale materiale poroso e dell'intercapedine);

h è lo spessore del pannello in metri (corrispondente alla lunghezza del collo dei risonatori).

In Figura 5.10 sono rappresentate schematicamente alcune trame di foratura e indicate le formule per il calcolo di p .

I pannelli forati risonanti assorbono con efficacia le medie frequenze. In Figura 5.11 si riportano i valori del coefficiente di assorbimento acustico di un pannello forato risonante di legno compensato dello spessore di 13 mm con fori del diametro di 4,8 mm e diverse percentuali di foratura, a 6 cm da una parete, con l'intercapedine riempita di materiale fonoassorbente poroso.

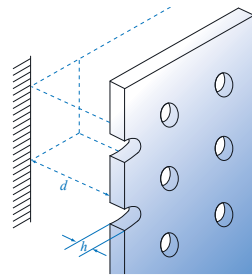


Figura 5. 9 – Schema di pannello forato risonante [4].

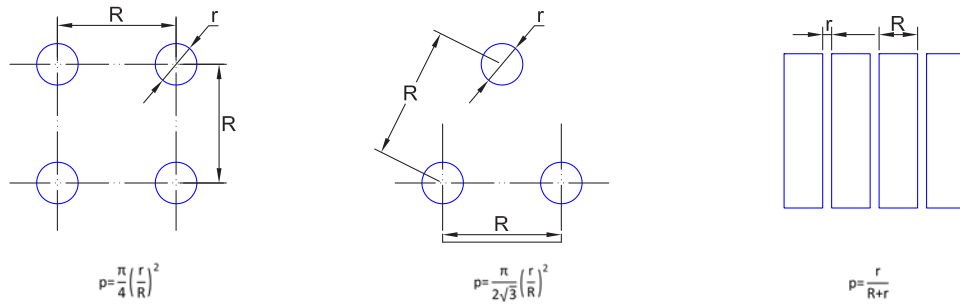


Figura 5. 10 – Formule per il calcolo di p per alcuni tipi di pannelli forati [3].

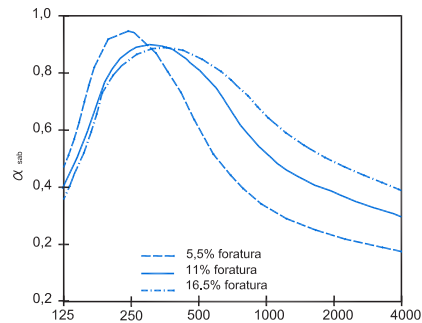


Figura 5. 11 – Valori del coefficiente di assorbimento acustico di un pannello forato risonante di legno compensato dello spessore di 13 mm con fori del diametro di 4,8 mm e diverse percentuali di foratura, a 6 cm da una

Elementi e sistemi fonoassorbenti

L'acustica interna degli ambienti oltre ad essere condizionata dagli aspetti dimensionali e volumetrici degli spazi, è determinata in modo prevalente dalle caratteristiche fisiche dei materiali che costituiscono le superfici.

La presenza di pareti, pavimento e soffitto piani e lisci, soprattutto con consistenza materica molto pesante e compatta, caratteristica peraltro comune alla maggior parte dei materiali edili, determina una condizione di elevata riflessione acustica: le onde sonore che incidono sulle superfici, vengono nuovamente riflesse verso l'ascoltatore sommandosi al suono diretto, generando una sovrapposizione di suoni e conseguente incremento del livello generale di rumore.

Questo fenomeno può essere limitato e corretto con l'installazione di adeguati sistemi fonoassorbenti nello spazio architettonico capaci di aumentare l'assorbimento acustico in ambiente quali: controsoffitti acustici (Figura 5. 12), pannelli murali (Figura 5. 13), isole acustiche (Figura 5. 14) e baffle sospesi a soffitto (Figura 5. 15).



Figura 5. 12 - Esempio di applicazione del controsoffitto acustico realizzato da pannelli Rockfon Blanka

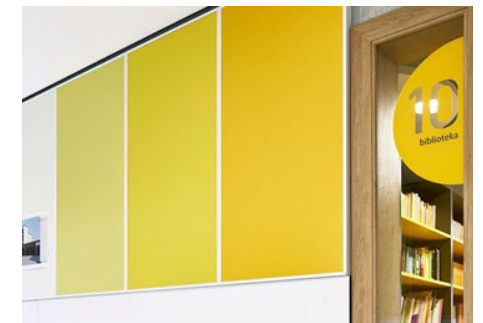


Figura 5. 13 - Esempio di applicazione dei pannelli murali Rockfon VertiQ

Suddetti sistemi vengono realizzati utilizzando pannelli fonoassorbenti generalmente di tipo poroso, già presentati nel paragrafo 5.1, disposti in svariate configurazioni ed applicazioni sia a parete che a soffitto grazie a diversi sistemi di ancoraggio. Questa peculiarità li rende versatili ed adatti a coprire le superfici di aule, uffici, sale riunioni e mense. Essi sono caratterizzati da elevate prestazioni di assorbimento acustico e sviluppati nel rispetto di elevati standard in termini di sicurezza, atossicità, leggerezza, durabilità e ininfiammabilità. Per i controsoffitti acustici e pannelli murali, le caratteristiche di assorbimento acustico sono quantificate attraverso il coefficiente di assorbimento acustico in funzione della frequenza in banda d'ottava o 1/3 d'ottava. In alternativa, è utilizzato un coefficiente di assorbimento acustico ponderato α_w ottenuto mediante il confronto con una curva di riferimento secondo il metodo indicato dalla norma UNI EN ISO 11654 [8].

Le isole acustiche e i baffle (o pannelli verticali sospesi), sono generalmente usati, disposti in file, per il trattamento acustico di grandi capannoni, alti spazi comuni, palestre, chiese, o sale conferenze. La loro capacità di assorbimento è fortemente condizionata dalla configurazione e messa in opera, dunque, per valutare in fase di progetto la variazione di tempo di riverberazione dovuta alla presenza dei pannelli sospesi, è necessario basarsi su misure effettuate in camera riverberante relative alla stessa configurazione. Le caratteristiche di assorbimento acustico vengono generalmente fornite in "area di assorbimento equivalente", in metri quadrati.



Figura 5.14 - Esempio di applicazione delle isole acustiche Rockfon Eclipse™

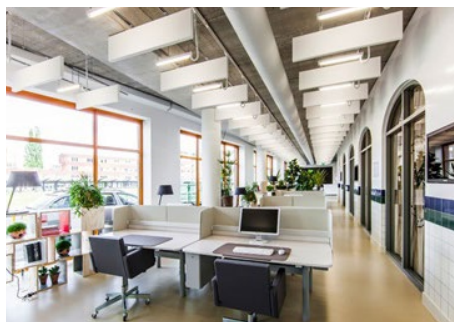


Figura 5.15 - Esempio di applicazione dei baffle acustici Rockfon Contour

L'installazione dei sopra citati sistemi fonoassorbenti può inoltre diventare l'occasione per una riqualificazione architettonica degli spazi, che non si limita ai soli aspetti funzionali: grande attenzione è posta infatti agli aspetti di design e resa estetica offerta da una vasta gamma di formati e colori.

La presenza di persone, arredi (poltrone più o meno imbottite) e complementi d'arredo (tende), può fare la differenza nel caratterizzare acusticamente un ambiente. Per le poltrone imbottite viene generalmente fornito il valore di area di assorbimento acustico equivalente per ogni singola poltrona, vuota o occupata, in metri quadrati, o, in alternativa, nel caso di una superficie totalmente occupata da poltrone, un coefficiente di assorbimento adimensionale. Lo stesso vale per le persone o il pubblico in generale.

In Tabella 5.1 sono riportati i coefficienti di assorbimento di diversi elementi, in metri quadrati, per ogni singola unità assorbente, mentre in Tabella 5.2 e Tabella 5.3 sono riportati i coefficienti di assorbimento acustico relativi a diversi materiali, arredi e superfici.

Tipo di materiale	Frequenza/Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
Persona seduta su sedia non imbottita	0,15	0,30	0,40	0,45	0,55	0,55
Persona seduta su sedia leggermente imbottita	0,10	0,15	0,20	0,25	0,25	0,25
Persona seduta su sedia altamente imbottita	0,05	0,05	0,05	0,10	0,10	0,15
Bambino della scuola materna	0,05	0,10	0,15	0,20	0,30	0,25
Alunno della scuola primaria (fino a 11 anni) eduto al tavolo	0,05	0,10	0,20	0,35	0,40	0,45
Studenti in un'aula ai tavoli di legno 3 m ² / persona	0,05	0,33	0,43	0,32	0,38	0,37
Bambini della scuola materna, seduti 2 m ² / persona	-	0,14	0,17	0,20	0,30	0,30
Armadio con ante fonoassorbenti, senza fondo, larghezza 1200 mm, 5 ante (altezza 1,75 m), distante dalle pareti (superficie in m ²)	1,63	1,84	1,31	1,63	1,54	1,56
Armadio con ante lisce, senza fondo, larghezza 1200 mm, 5 ante (altezza 1,75 m), distante dalle pareti (superficie in m ²)	0,83	0,76	0,52	0,48	0,41	0,46
Isola in fibra di vetro riciclata con tinteggiatura microporosa, dimensioni 2400x1200 mm, spessore 40 mm, sospesa dal solaio 200 mm	0,90	2,40	3,40	4,00	4,10	3,80

I valori delle prime 3 righe si basano su una fila di sedie con circa 0,5 m² / persona. I valori delle righe 4 e 5 si basano su una disposizione di posti a sedere tipica delle aule con tavoli e con sedie non imbottite.

Tabella 5.1 - Area di assorbimento acustico equivalente (in m²) per alcuni elementi fonoassorbenti.

Tipo di materiale	Spessore/mm	Frequenza/Hz					
		125	250	500	1000	2000	4000
Intonaco liscio	-	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06
Intonaco di calce e cemento	-	0,03	0,03	0,02	0,04	0,05	0,05
Stucco di gesso, calcestruzzo a vista	-	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Calcestruzzo [10]	-	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,05
Mattoni intonacati [11]	-	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
Vetro singolo [10]	4	0,30	0,20	0,10	0,07	0,05	0,02
Vetro camera, con vetri di spessore di 2-3 mm e intercapedine d'aria di spessore di 10 mm [10]	14-16	0,15	0,05	0,03	0,03	0,02	0,02
Finestre (vetri doppi)	0,28	0,20	0,11	0,06	0,03	0,02	0,02

Tipo di materiale	Spessore/ mm	Frequenza/Hz					
		125	250	500	1000	2000	4000
Rivestimenti di pareti e soffitti							
Intonaco acustico [10]	9	0,02	0,08	0,30	0,60	0,80	0,90
Pannello in fibre rigido di spessore 4 mm, montato in assenza d'isolante, ad una distanza dalla parete di 60 mm	4	0,22	0,19	0,13	0,07	0,05	0,05
Pannello in fibre rigido di spessore 4 mm, montato con pannello in lana minerale spessore 40 mm, ad una distanza dalla parete di 60 mm	4	0,63	0,25	0,14	0,08	0,06	0,05
Pannello di compensato di spessore 4 mm, montato con pannello in lana minerale spessore 40 mm, ad una distanza dalla parete di 120 mm	4	0,77	0,33	0,16	0,08	0,07	0,03
Lastra in cartongesso, spessore 9,5 mm, montata ad una distanza dalla parete di 25 mm	9.5	0,27	0,17	0,10	0,09	0,11	0,12
Lastra in cartongesso, spessore 9,5 mm, ad una distanza dalla parete di 60 mm con intercapedine d'aria	9.5	0,30	0,10	0,05	0,07	0,09	0,08
Pannello leggero in lana di legno spessore 35 mm applicata direttamente a parete	35	0,08	0,17	0,70	0,71	0,64	0,64
Pannello leggero in lana di legno spessore 25 mm, ad una distanza di 50 mm dalla parete, con intercapedine vuota	25	0,13	0,42	0,54	0,45	0,70	0,73
Pannello murale Rockfon in lana di roccia, applicato in aderenza alla muratura	40	0,25	0,75	1,00	1,00	1,00	1,00
Pannello per controsoffitti Rockfon in lana di roccia, applicato in aderenza al solaio	20	0,10	0,25	0,70	0,95	1,00	1,00
Pannello per controsoffitti Rockfon in lana di roccia, applicato in aderenza al solaio	40	0,20	0,70	1,00	1,00	1,00	1,00
Pannello per controsoffitti Rockfon in lana di roccia, installato con plenum di 200mm	15	0,40	0,70	0,90	0,80	0,95	0,95
Pannello per controsoffitti Rockfon in lana di roccia, installato con plenum di 200mm	20	0,60	0,90	1,00	0,90	1,00	1,00
Pannello per controsoffitti Rockfon in lana di roccia, installato con plenum di 200mm	40	0,55	0,80	0,95	1,00	1,00	1,00
Pavimentazioni							
Marmo, piastrelle, clinker	-	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
Parquet incollato	-	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06
Pavimento in PVC di spessore 2,5 mm, su substrato in calcestruzzo	2,5	0,01	0,02	0,01	0,03	0,05	0,05
Pavimento in Linoleum, su substrato in calcestruzzo	-	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04

Pavimentazioni							
Moquette di spessore fino a 6 mm, su substrato massivo	≤6	0,02	0,04	0,07	0,19	0,29	0,35
Feltro di spessore 7 mm, su substrato massivo	7	0,02	0,04	0,12	0,20	0,36	0,57
Legno impiallacciato o pannello di truciolo denso, su sottofondo compatto	-	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06

Tabella 5. 2 - Coefficienti di assorbimento acustico (-) per alcuni materiali di uso corrente (principalmente da [9]).

Tipo di materiale	Spessore/ mm	Frequenza/Hz					
		125	250	500	1000	2000	4000
Tende							
Tende a pannelli contro parete rigida	-	0,05	0,15	0,35	0,40	0,50	0,50
Tenda in cotone (0,5 kg/m ²), drappeggiata per circa il 75% dell'area, posta a 130 mm dalla parete	-	0,30	0,45	0,65	0,56	0,59	0,71
Tende leggere (0,2 kg/m ²) appese a 90 mm dalla parete	-	0,05	0,06	0,39	0,63	0,70	0,73
Tendaggi < 0,2 kg/m ² , di fronte a una superficie rigida [11]	0-200	0,05	0,06	0,09	0,12	0,18	0,22
Tendaggi (0,4 kg/m ²) con tessuto piegato o increspato (>1:3), di fronte a una superficie rigida [11]	0-200	0,10	0,40	0,70	0,90	0,95	1,00
Porte							
Porta acustica, con telaio in acciaio, doppia guarnizione e spazio vuoto assorbente [10]	-	0,35	0,39	0,44	0,49	0,54	0,57
Porta in legno laccata	-	0,10	0,08	0,06	0,05	0,05	0,05
Persone e arredi							
Superficie totalmente occupata dal pubblico [10]	-	0,39	0,57	0,80	0,94	0,92	0,87
Bambini in un'aula con mobili rigidi, 1 per ogni area di 1 m ² [11]	-	0,10	0,20	0,25	0,35	0,40	0,40
Fila di persone sedute con interasse da 0,9 a 1,2 m (pubblico); minimo tipico [11]	-	0,20	0,40	0,50	0,60	0,70	0,70
Fila di persone sedute con interasse da 0,9 a 1,2 m (pubblico); massimo tipico [11]	-	0,60	0,70	0,80	0,90	0,90	0,90
Fila di poltrone imbottite con interasse da 0,9 a 1,2 m; minimo tipico [11]	-	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,50
Fila di poltrone imbottite con interasse da 0,9 a 1,2 m; massimo tipico [11]	-	0,50	0,70	0,80	0,90	1,0	1,0

Tipo di materiale	Spessore/ mm	Frequenza/Hz					
		125	250	500	1000	2000	4000
Persone e arredi							
Fila di sedie in legno o plastica con interasse da 0,9 a 1,2 m [11]	-	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16
Poltrone mediamente imbottite [12]	-	0,54	0,62	0,68	0,70	0,68	0,66
Poltrone imbottite [12]	-	0,70	0,76	0,81	0,84	0,84	0,81
Altre superfici							
Scaffali per libri in biblioteca (superficie in m ²)	-	0,30	0,39	0,39	0,31	0,29	0,21
Grandi aperture (dimensione minima > 1 m ²) [11]	-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Griglia dell'aria, area aperta al 50% [11]	-	0,30	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50

Tabella 5. 3 - Coefficienti di assorbimento acustico (-) per alcuni arredi e superfici (principalmente da [9]).

5.2 LE AULE PER LA DIDATTICA

La progettazione acustica di aule per la didattica è finalizzata alla comprensione ottimale del messaggio parlato. L'eccesso di rumore e di riverberazione determinano il mascheramento del segnale emesso dal parlatore rendendolo meno intelligibile per l'ascoltatore. In particolare, una lunga coda sonora causa il mascheramento tra le sillabe emesse in successione dal parlatore degradando la qualità della comunicazione. Un elevato tempo di riverberazione porta inoltre ad un incremento del rumore di fondo "riverberato" che riduce ulteriormente l'intelligibilità.

Gli interventi per la correzione acustica dell'aula devono prevedere l'applicazione di materiali di diversa tipologia al fine di assorbire efficacemente sull'intero spettro di frequenze di interesse. In linea di principio, è preferibile distribuire uniformemente le superfici e gli elementi assorbenti all'interno dell'ambiente; se questa condizione viene disattesa, possono determinarsi, particolarmente in grandi ambienti, disuniformità acustiche, mentre estese superfici riflettenti possono portare a difetti acustici come l'eco, il flutter eco e le focalizzazioni sonore.

Eco, flutter eco e focalizzazioni sonore

Si ha eco quando prime riflessioni sonore intense raggiungono all'orecchio dell'ascoltatore dopo 50 ms dall'arrivo del suono diretto. Il suono che giunge dopo tale intervallo può essere dannoso per una buona intelligibilità, in quanto percepito come una riflessione distinta. Considerando la velocità di propagazione del suono nell'aria, pari a circa 340 m/s, si determina una differenza tra il percorso del suono diretto e quello del suono riflesso pari almeno a 17 m.

Pareti piane e parallele generano riflessioni multiple: si sviluppa il fenomeno del *flutter eco* quando il suono subisce varie riflessioni equidistanti nel tempo tra due pareti parallele. Tale eco ripetuto è dannoso per la comprensione del parlato, poiché causa forti colorazioni del tono.

La presenza di superfici concave riflettenti di grandi dimensioni rispetto alla lunghezza d'onda del suono incidente produce una focalizzazione sonora concentrando l'energia in particolari punti, rendendo disuniforme la distribuzione del suono nell'ambiente.

Il corretto posizionamento dei materiali fonoassorbenti nelle aule scolastiche deve inoltre considerare il possibile danneggiamento dei rivestimenti da parte degli studenti. A tal fine i materiali più delicati devono essere applicati ad altezze adeguate da terra.

Il trattamento acustico dovrebbe riguardare innanzitutto la parete di fondo e la parte posteriore del soffitto, che in aule di grandi dimensioni potrebbe portare a fenomeni di eco che potrebbe portare ad una riduzione dell'intelligibilità del discorso in particolare nelle prime file, per poi trattare la parte alta delle superfici laterali, sempre a partire dal fondo dell'aula. Una parte di soffitto in corrispondenza del parlatore dovrebbe essere lasciata riflettente al fine di incrementarne il livello sonoro verso il fondo della stanza.

La Figura 5. 16 mostra degli esempi di collocazioni favorevoli (in blu) e sfavorevoli (in grigio) di superfici fonoassorbenti alle pareti e al soffitto per un ambiente destinato all'ascolto della parola.

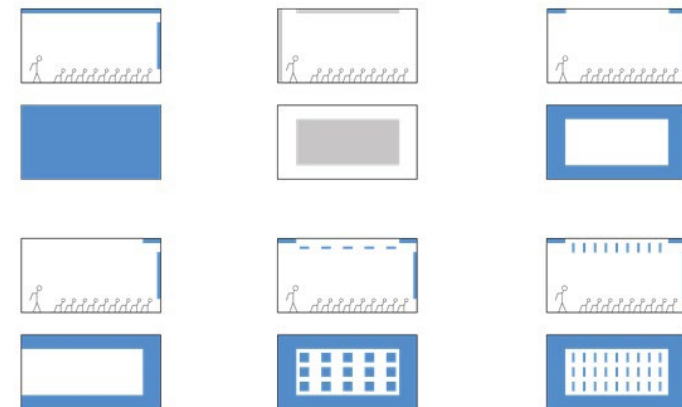


Figura 5. 16 – Esempi di collocazioni favorevoli (in blu) e sfavorevoli (in grigio) di superfici fonoassorbenti alle pareti e al soffitto in ambienti di piccole e medie dimensioni.

In Figura 5. 17 sono riportati due esempi di collocazione di materiale fonoassorbente e fonoriflettente sulla parete di fondo e la parte posteriore del soffitto in ambienti di grandi dimensioni. Queste superfici dovranno essere trattate con materiale fonoassorbente oppure con superfici riflettenti inclinate in modo che il suono incidente si rifletta come contributo positivo presso gli ascoltatori delle ultime file.



Figura 5. 17 - Esempi di collocazione di materiale fonoassorbente e fonoriflettente sulla parete di fondo e la parte posteriore del soffitto in un'aula scolastica di grandi dimensioni.

Al fine di evitare il fenomeno del *flutter eco*, generato dalla presenza di superfici piane e parallele occorre che almeno una delle due sia rivestita o materiale assorbente o con elementi fonodiffondenti capaci di diffondere, per l'appunto, i raggi sonori. Queste due possibili soluzioni sono raffigurate in Figura 5. 18.



Figura 5. 18 - Esempi di collocazione

5.3 INTERVENTO DI CORREZIONE ACUSTICA IN UN'AULA DI SCUOLA MATERNA

In questo paragrafo è descritto un intervento di correzione acustica in un'aula di scuola materna. Si tratta di un esempio di trattamento acustico riferito ad una specifica tipologia di aula all'interno di un edificio contemporaneo. È utile sottolineare che è necessario prevedere un progetto di correzione acustica specifico per ciascuna aula all'interno dei diversi edifici scolastici.

5.3.1 Descrizione dell'aula prima del trattamento acustico

L'aula oggetto di studio occupa la parte nord dell'ala lunga della Scuola dell'Infanzia "E. Pasquet" (Figura 5. 19). Il fabbricato si eleva su un solo piano fuori terra, è stato costruito negli anni 2006/2007 ed è situato in una zona residenziale e poco trafficata del comune di Bagnolo Piemonte, in provincia di Cuneo.



Figura 5. 19 – Posizione dell'aula oggetto di studio.

Essa rappresenta un'aula tipo della scuola, con soffitti già fonoassorbenti e grandi superfici finestrate ed è attualmente utilizzata per attività a tavolino. L'ambiente ha una pianta pressoché quadrata con una superficie pari a 66 m² (8.25 m x 8 m), un'altezza di 3 m ed un volume di 198 m³.



Figura 5. 20 – Immagine dal cortile esterno della Scuola Materna Comunale "E. Pasquet".

L'edificio è costruito con struttura a telaio in cemento armato e tamponature intonacate in laterizio forato a doppia parete con interposto un isolante. Il pavimento è rivestito da comuni piastrelle in ceramica. L'aula è sormontata da un controsoffitto fonoassorbente a quadrotte (600*600*15 mm) in materiale poroso. La porta tamburata che separa l'aula dal corridoio è a doppia anta asimmetrica, rivestita con materiale ligneo verniciato e sormontata da un sopraluca trasparente costituito da un vetro singolo. L'aula ha due portefinestre affacciate su una piccola area verde lungo Via Don Lorenzo Milani, i serramenti sono costituiti da telaio in PVC e vetro basso emissivo con gas argon, così stratificato 3+3/16/3+3 con PVB sia sul lato interno che su quello esterno. Gli arredi consistono in panche e sedioline in nobilitato colorato, sedie con seduta e schienale imbottiti, materassini morbidi in tessuto plastico per le attività ludiche, giocattoli e sussidi educativi, una cattedra, scaffali ed armadietti in legno composito.

La ventilazione ed il riscaldamento in ambiente è garantita dalla presenza di due canali circolari di mandata e ripresa ($\varnothing 250\text{mm}$) posti in sospensione al di sotto del controsoffitto e collegati ad un'unità di trattamento aria esterna. Alle pareti sono appesi pochi disegni e pannelli decorativi in polistirene espanso da 20 mm.

In Figura 5. 21 è riportata una foto dell'aula prima dell'intervento di correzione acustica allestita con gli strumenti per la misura dei parametri acustici mentre in Figura 5. 22 viene mostrata una vista in pianta dell'aula semplificando la rappresentazione degli arredi sopra descritti rispetto alle sole panche, cattedra, scaffali ed armadietti. Figura 5. 23, Figura 5. 24 e Figura 5. 25 illustrano rispettivamente una vista isometrica e le sezioni prospettiche dell'ambiente oggetto di intervento.



Figura 5. 21 – Foto dell'aula arredata prima dell'intervento di correzione acustica.

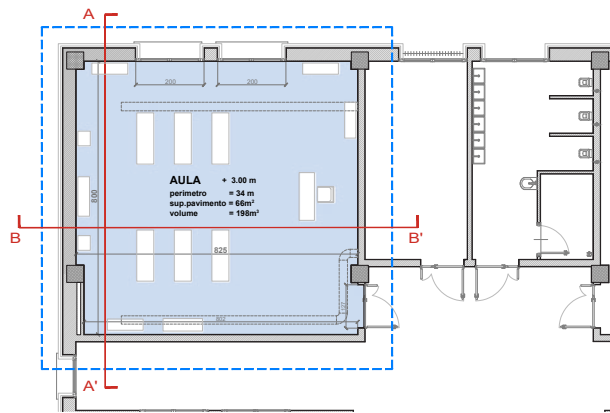


Figura 5. 22 – Pianta dell'aula oggetto di studio.

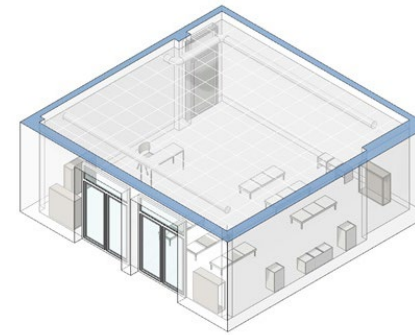


Figura 5. 23 – Vista isometrica dell'aula.

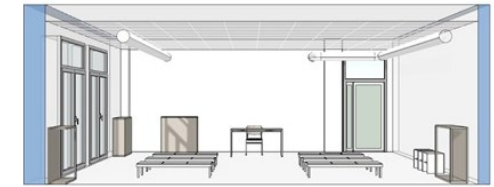


Figura 5. 24 – Sezione prospettica A.



Figura 5. 25 – Sezione prospettica B.

5.3.2 Misure acustiche

Nella condizione ante e post operam, al fine di determinare in maniera oggettiva la qualità acustica dell'ambiente sono stati misurati i seguenti parametri acustici:

- Tempo di riverberazione T;
- Chiarezza del parlato C50;
- Indice d'intelligibilità del parlato STI.

Le misure dei parametri di cui sopra sono state eseguite ad ambiente arretrato e non occupato (max 2 persone) per tutte le posizioni utente (facoltative ed obbligatorie) indicate dalla UNI 11532-2 [9] ed illustrate in Figura 5. 26.

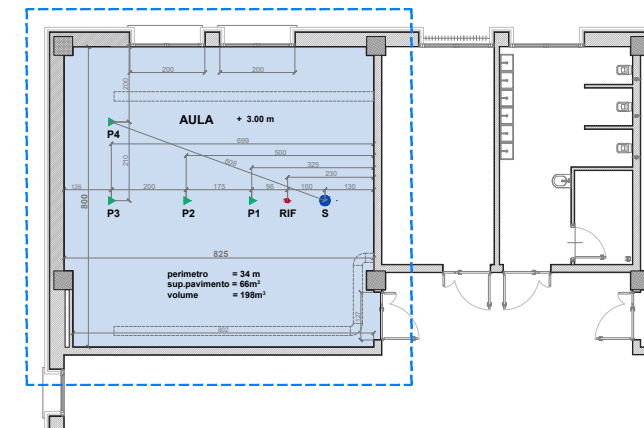


Figura 5. 26 – Punti di misurazione nell'aula, secondo la UNI 11532-2.

Rispetto alla figura sopra, si specifica che:

1. il punto sorgente S è stato posizionato ad un'altezza di 1,5 m in corrispondenza della cattedra;
2. il punto di riferimento RIF, utilizzato per valutare il livello di pressione sonora a 1m dalla sorgente utilizzata, è stato posizionato ad un'altezza di 1,5 m;
3. i punti ricevitore Pn sono posizionati ad un'altezza di 1,1 m e collocati in corrispondenza delle posizioni possibilmente assunte dai bambini (panche) a seconda della disposizione degli arredi rilevata al momento delle misure.

La tecnica per la misurazione dei descrittori acustici è basata sulla risposta all'impulso, ottenuta con sorgente omnidirezionale nel caso del tempo di riverberazione T (vedi Figura 5. 27) e con sorgente con direttività simile a quella della voce umana per la valutazione della chiarezza C50 e dell'indice d'intelligibilità del parlato STI. Per la misura di quest'ultimo parametro, così come stabilito dalla UNI 11532-2, la sorgente utilizzata deve essere in grado di generare un segnale di emissione ad 1 m in asse con la sorgente stessa pari a 60 dB(A).

Tutti i valori dei descrittori acustici misurati prima di essere confrontati con valori di riferimento indicati dalla norma UNI 11532-2 sono stati corretti con l'incertezza di misura.



Figura 5. 27 - Misura del tempo di riverberazione.

5.3.3 Risultati delle misurazioni ante operam

In Figura 5. 28 sono riportati, in frequenza per bande di ottava, il tempo di riverberazione T misurato prima dell'intervento di correzione acustica in condizioni di aula arredata e non occupata, ed il tempo di riverberazione T stimato in condizioni di aula arredata con occupazione pari all'80% della capienza indicata a progetto, calcolato con l'equazione (3.2) al fine di confrontarlo con i limiti di riferimento stabiliti dalla norma UNI 11532-2 [9].

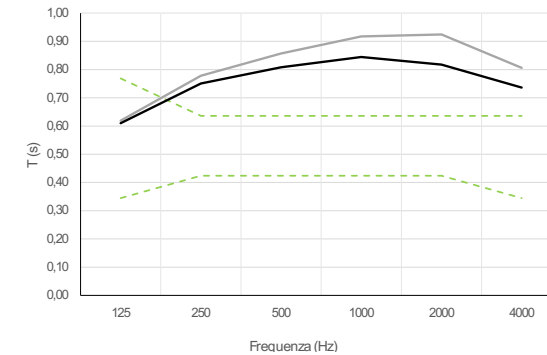


Figura 5. 28 – Grafico di confronto fra il tempo di riverberazione misurato prima dell'intervento di correzione acustica ad aula arredata e non occupata (linea grigia) e il tempo di riverberazione stimato in condizioni di aula arredata e occupata all'80% della capienza indicata a progetto (linea nera). I valori compresi tra le linee tratteggiate in verde rappresentano l'intervallo di conformità della UNI 11532-2.

Il tempo di riverberazione ad aula occupata alle medie e alte frequenze è maggiore dei valori ottimali ottenuti in accordo con la UNI11532-2 [9] e riportati nella Tabella 5. 4.

Tabella 5. 4 – Intervallo di conformità del tempo di riverberazione in funzione della frequenza in accordo con la UNI 11532-2.

Limite di riferimento	T (s)					
	Frequenze (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
T _{ott, max}	0,82	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68
T _{ott}	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
T _{ott, min}	0,37	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45

In Tabella 5.7 e Tabella 5. 8 sono riportati i valori di C50 e STI, rispettivamente, misurati prima del trattamento acustico in condizioni di aula arredata e non occupata. Il valore di C50 è inferiore al limite di 2 dB stabilito dalla UNI11532-2, mentre il valore di STI è superiore al limite di 0,55 fissato dalla norma per l'aula oggetto di studio.

5.3.4 Il progetto acustico

Il progetto acustico è iniziato dall'analisi dello stato di fatto. Sono state computate le superfici corrispondenti ai diversi materiali di rivestimento, ad ogni materiale è stato associato un coefficiente di assorbimento acustico per ciascuna banda di ottava da 125 Hz a 4000 Hz. I coefficienti di assorbimento dei materiali sono stati desunti dall'Appendice C della UNI 11532-2 (vedi Tabella 5.1, Tabella 5. 2 e Tabella 5. 3).

A partire dalla determinazione delle aree di assorbimento equivalente è stato calcolato il tempo di riverberazione riferito allo stato di progetto in condizioni di aula arredata e non occupata tramite la formula di Sabine (vedi paragrafo 3.1). L'assorbimento acustico dell'aria, che andrebbe considerato in ambienti di dimensioni maggiori (volume $\geq 250 \text{ m}^3$), è stato trascurato.

I descrittori chiarezza C50 e indice d'intelligibilità del parlato STI, in fase di progetto sono stati determinati applicando i calcoli previsionali contenuti nella UNI 11532-1 [13] descritti nei paragrafi 3.6.2 e 3.6.3.

L'intervento di correzione acustica

L'intervento di correzione acustica è consistito nella posa in opera di un controsoffitto fonoassorbente ed anti-sfondellamento. Quest'ultima specifica è sempre più richiesta dal momento che risolve definitivamente uno dei fenomeni di degrado caratteristici negli edifici esistenti, consistente nel distacco all'intradosso dei solai di elementi in laterizio.

Il tipo di pannelli fonoassorbenti in lana di roccia ad alta densità utilizzato per il trattamento acustico a soffitto, è stato il Rockfon Blanka® Activity (dimensioni 600 mm x 600 mm, spessore 40 mm, densità 160 kg/m³).

I pannelli sono stati applicati a soffitto mantenendo la medesima dimensione dell'intercapedine pari a 300 mm. I coefficienti di assorbimento forniti dalla casa produttrice, si riferiscono ad un'intercapedine di 200 mm, sono stati, quindi, modificati per adattarli alla nuova intercapedine. In particolare, è stata calcolata la minima frequenza di massimo assorbimento corrispondente all'intercapedine di 300 mm, che è risultata essere inferiore a quella corrispondente all'intercapedine di 200 mm (Figura 5. 29).

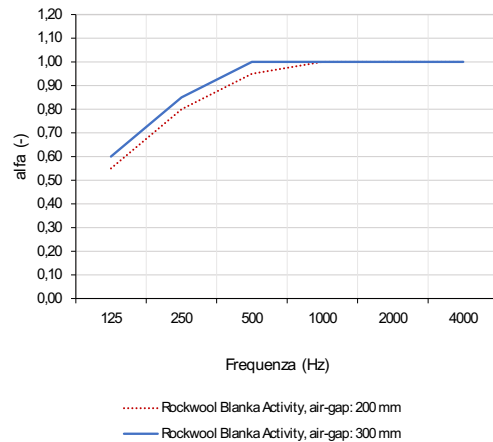


Figura 5. 29 – Coefficienti di assorbimento acustico del pannello riferiti all'intercapedine di 200mm e 300 mm.

In Figura 5. 30 sono riportate alcune immagini dell'aula a trattamento acustico ultimato.



Figura 5. 30 - Fotografie dell'aula dopo il trattamento acustico.

Calcolo dei parametri acustici

In Tabella 5. 5 è riportato il calcolo dell'area di assorbimento equivalente e del tempo di riverberazione, in frequenza, per bande di ottava, ad aula arredata e non occupata e ad aula occupata da 15 bambini, dopo il trattamento acustico.

Tabella 5. 5 – Calcolo del tempo di riverberazione effettuato tramite la formula di Sabine per l'aula della scuola materna "E. Pasquet" di Bagnolo Piemonte (CN).

Calcolo del tempo di riverberazione								
Larghezza 8,25 m	Lunghezza 8,00 m	Altezza 3,00 m	Volume				≈200 m ³	DIMENSIONI
Tipo di materiale	Coefficiente di assorbimento acustico, a/-						Superficie materiale (m ²)	Collocazione nell'aula
	125	250	500	1000	2000	4000		
Piastrelle in ceramica	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	66,0	PAVIMENTO
Intonaco	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	87,6	PARETI
Vetro doppio	0,28	0,20	0,11	0,06	0,03	0,02	11,6	
Sopraluce	0,20	0,14	0,07	0,05	0,03	0,02	1,0	
Porta	0,10	0,08	0,06	0,05	0,05	0,05	2,8	SOFFITTO
Rockfon Blanka Activity: spessore 40 mm plenum 300 mm	0,60	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00	66,0	

Tipo di materiale	Coefficiente di assorbimento acustico, α -						Superficie materiale (m^2)	Collocazione nell'aula
	125	250	500	1000	2000	4000		
$\alpha_i \times S \text{ m}^2$								
Piastrelle in ceramica	1,32	1,32	1,32	1,32	1,98	1,98		PAVIMENTO
Intonaco	1,75	1,75	1,75	2,63	2,63	3,51		PARETI
Vetro doppio	3,25	2,32	1,28	0,70	0,35	0,23		
Sopraluce	0,20	0,14	0,07	0,05	0,03	0,02		
Porta	0,28	0,22	0,17	0,14	0,14	0,14		
Rockfon Blanka Activity: spessore 40 mm plenum 300 mm	39,6	59,4	66,0	66,0	66,0	66,0		SOFFITTO
$\sum_{i=1}^k a_i S_i \text{ m}^2$								
	48,2	67,6	73,9	74,9	76,2	75,6		
Tipo di unità assorbenti	Assorbimento acustico equivalente, $A \text{ (m}^2\text{)}$						n (-)	
	125 (Hz)	250 (Hz)	500 (Hz)	1000 (Hz)	2000 (Hz)	4000 (Hz)		
Banco e sedia di scuola primaria	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,00	18	
Bambino della scuola materna	0,06	0,10	0,15	0,20	0,30	0,25	15	
Tipo di unità assorbenti	Assorbimento acustico equivalente, $A \text{ (m}^2\text{)}$						n (-)	
	125 (Hz)	250 (Hz)	500 (Hz)	1000 (Hz)	2000 (Hz)	4000 (Hz)		
$\sum_{j=1}^q n_j A_j \text{ m}^2$								
Aula occupata da 15 bambini	0,75	1,50	2,25	3,00	4,50	3,75		
$A_{tot} = \sum_{i=1}^k a_i S_i + \sum_{j=1}^q n_j A_j \text{ m}^2$								
Aula arredata non occupata	79,5	88,8	86,9	81,0	79,5	76,6		
Aula occupata da 15 bambini	80,2	90,3	89,2	84,0	84,0	83,3		
$T = 0,16 \frac{V}{A_{tot}} \text{ s}$								
Aula arredata non occupata	0,65	0,47	0,43	0,44	0,44	0,44	$T_{m,250, 500, 1000, 2000 \text{ Hz}} = 0,44 \text{ s}$	
Aula occupata da 15 bambini	0,65	0,47	0,43	0,42	0,41	0,42	$T_{m, 250, 500, 1000, 2000 \text{ Hz}} = 0,43 \text{ s}$	

In Tabella 5.7 e Tabella 5.8 vengono restituiti i valori calcolati a progetto della chiarezza C50 e dell'indice d'intelligibilità del parlato STI, sia per ogni singola posizione utente, sia come media aritmetica dei valori rilevati nelle posizioni di misura, in condizioni di aula arredata e non occupata.

La chiarezza del parlato C50 è calcolata in modo puntuale a partire dalle misure del tempo di riverberazione in accordo con la formula (3.36). I valori dell'indice STI calcolati e riportati in Tabella 5.8 si riferiscono ad un parlatore di sesso maschile e sforzo vocale normale (livello di pressione sonora ponderato A, a 1 m dalla bocca del parlatore pari a 60 dB(A)).

I valori di progetto per tutti i parametri acustici considerati (T, C50 e STI) sono conformi ai valori ottimali della norma UNI 11532-2.

5.3.5 Risultati delle misurazioni post operam

In Figura 5.32 sono riportati, in frequenza per bande di ottava, il tempo di riverberazione T misurato dopo l'intervento di correzione acustica in condizioni di aula arredata e non occupata, ed il tempo di riverberazione T stimato in condizioni di aula arredata con occupazione pari all'80% della capienza indicata a progetto, calcolato con l'equazione (3.2) al fine di confrontarlo con i limiti di riferimento stabiliti dalla norma UNI 11532-2.

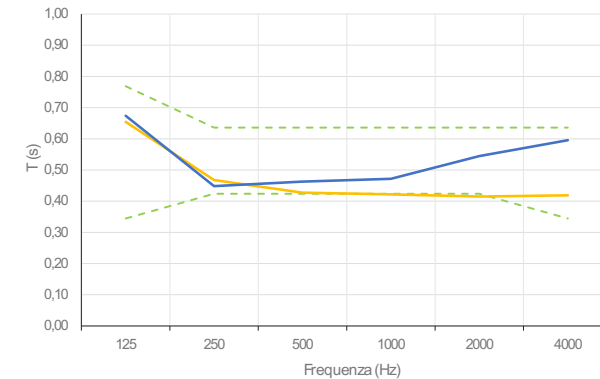


Figura 5.32 – Grafico di confronto fra il tempo di riverberazione misurato dopo l'intervento di correzione acustica ad aula arredata e non occupata (linea blu) e il tempo di riverberazione stimato in condizioni di aula arredata e occupata all'80% della capienza indicata a progetto (linea gialla). I valori compresi tra le linee tratteggiate in verde rappresentano l'intervallo di conformità della UNI 11532-2.

Dal grafico in Figura 5.32 si può osservare che il tempo di riverberazione T a seguito l'intervento acustico si attesta sui valori ottimali stabiliti dalla norma UNI 11532-2 garantendo una condizione acustica soddisfacente.

Al fine di confrontare i valori del tempo riverberazione nelle diverse condizioni, in Tabella 5.6 si riportano i valori di tempo di riverberazione, in frequenza, per bande di ottava, misurati prima dell'intervento acustico, calcolati a progetto e misurati dopo l'intervento acustico, in condizioni di aula arredata occupata e non occupata. Sono inoltre indicati i valori ottimali stabiliti dalla UNI11532-2 e i rispettivi valori medi tra 250 Hz e 2000 Hz.

Condizione	T (s)						T _m (0,25 - 2 kHz)
	Frequenza (Hz)						
	125	250	500	1000	2000	4000	
Condizione ante operam, aula arredata e non occupata	0,61	0,75	0,81	0,84	0,82	0,74	0,87
Condizione ante operam, aula arredata e occupata	0,62	0,78	0,86	0,92	0,92	0,81	0,81
Condizione post operam, aula arredata e non occupata, progetto	0,65	0,47	0,43	0,44	0,44	0,44	0,44
Condizione post operam, aula arredata e occupata, progetto	0,65	0,47	0,43	0,42	0,41	0,42	0,43
Condizione post operam, aula arredata e non occupata	0,68	0,46	0,48	0,49	0,59	0,64	0,50
Condizione post operam, aula arredata e occupata	0,67	0,45	0,46	0,47	0,54	0,60	0,48

Tabella 5. 6 – Tempo di riverberazione misurato e calcolato in diverse condizioni ante e post operam e valori ottimali secondo la norma UNI11532-2.

Nel grafico in Figura 5. 33 si riportano i valori misurati di C50 prima e dopo l'intervento di correzione acustica e il valore calcolato a progetto.

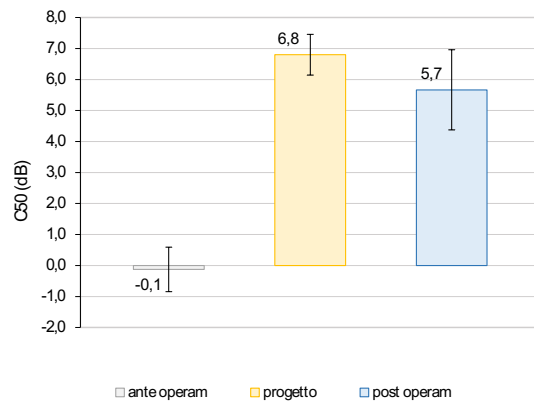


Figura 5. 33 - Grafico di confronto fra i valori di chiarezza C50 misurati nell'aula oggetto di studio prima e dopo l'intervento di correzione acustica, e il valore calcolato a progetto. La linea verde tratteggiata rappresenta il limite inferiore di riferimento definito dalla UNI 11532-2. Le barre d'errore indicano la deviazione standard della media spaziale.

In Tabella 5.7 si riportano, per ciascuna posizione di misura, i valori di C50 nell'aula prima e dopo l'intervento di correzione acustica, il valore calcolato a progetto e il valore di riferimento stabilito dalla UNI11532-2.

Condizione	C50 (dB)				C50
	Posizioni di misura/valutazione				
	P1	P2	P3	P4	
	Distanza sorgente-ricevitore (m)				
	1,9	3,7	5,7	6,1	
Condizione ante operam, aula arredata e non occupata	1,1	-0,3	-0,5	-0,8	-0,1
Condizione post operam, aula arredata e non occupata, progetto	7,9	6,7	6,3	6,3	6,8
Condizione post operam, aula arredata e non occupata	7,7	5,8	4,1	5,1	5,7
UNI 11532-2:2020					≥2

Tabella 5.7 – Valori della Chiarezza (C50) in diverse posizioni nell'aula, ante e post operam, valori medi spaziali e valori ottimali secondo la norma UNI11532-2.

La condizione post operam garantisce un valore di chiarezza C50 superiore a 2 dB co come richiesto dalla normativa UNI 11532-2.

Nel grafico in Figura 5. 34 si riportano i valori misurati di Speech Transmission Index prima e dopo l'intervento di correzione acustica e il valore calcolato a progetto.

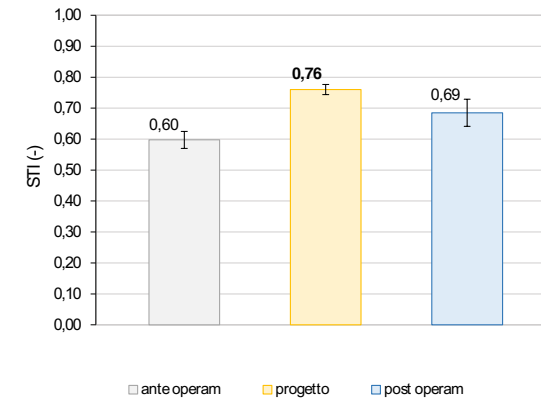


Figura 5. 34 - Grafico di confronto fra i valori di STI misurati nell'aula oggetto di studio prima e dopo l'intervento di correzione acustica, e il valore calcolato a progetto. La linea verde tratteggiata rappresenta il limite inferiore di riferimento definito dalla UNI 11532-2. Le barre d'errore indicano la deviazione standard della media spaziale.

In Tabella 5. 8 si riportano per ciascuna posizione di misura, i valori di STI misurati nell'aula prima e dopo l'intervento di correzione acustica, il valore calcolato a progetto e il valore di riferimento stabilito dalla UNI11532-2.

Condizione	STI (-)				STI
	Posizioni di misura/valutazione				
	P1	P2	P3	P4	
	Distanza sorgente-ricevitore (m)				
	1,9	3,7	5,7	6,1	
Condizione ante operam, aula arredata e non occupata	0,63	0,62	0,59	0,56	0,60
Condizione post operam, aula arredata e non occupata, progetto	0,79	0,76	0,75	0,75	0,76
Condizione post operam, aula arredata e non occupata	0,75	0,63	0,70	0,67	0,69
UNI 11532-2:2020					≥0,55

Tabella 5. 8 – Valori di STI in diverse posizioni nell'aula, ante e post operam, valori medi spaziali e valori ottimali secondo la norma UNI11532-2.





L'indice di intelligibilità del parlato STI a seguito dell'intervento di rinnovamento acustico è pari a 0,69, con un incremento del 15% rispetto al valore ante operam.

Riferimenti bibliografici

1. Norma Italiana UNI EN ISO 354:2003. Acustica - Misura dell'assorbimento acustico in camera riverberante.
2. British Standard BS 8233:1999. Sound insulation and noise reduction for buildings – Code of practice.
3. Benedetto G. e Spagnolo R., "Assorbimento acustico di materiali e strutture", in Manuale di acustica applicata, CittàStudi, novembre 2007, ISBN: 978825173208.
4. Cirillo E., "Acustica applicata", McGraw-Hill, 1997.
5. Alton Everest F., "Manuale di acustica", Hoepli, 1996.
6. Pompoli F., "Assorbimento acustico dei materiali in lana di roccia ROCKWOOL", Capitolo 3 in "Acustica in edilizia, teoria, applicazioni, prove tecniche, normativa", ROCKWOOL Italia.
7. Fausti P., "Acustica edilizia", Capitolo 2 in "Acustica in edilizia, teoria, applicazioni, prove tecniche, normativa", ROCKWOOL Italia.
8. Norma Italiana UNI EN ISO 11654:1998. Acustica - Assorbitori acustici per l'edilizia - Valutazione dell'assorbimento acustico.
9. Norma Italiana UNI 11532-2:2020. Acustica – Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati – Metodi di programmazione e tecniche di valutazione. Settore scolastico.
10. Department for Education and Skills, Building Bulletin 93, Acoustic Design of School. London: The Stationery Office, 2003 (www.teachernet.gov/acoustics).
11. Norma Italiana UNI EN 12354-6:2006. Acustica in Edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti. Assorbimento acustico in ambienti chiusi.
12. Beranek L.L. e Hidaka T., "Sound absorption in concert halls by seats, occupied and unoccupied, and by the hall's interior surfaces", J. Acoust. Soc. Am. 104(6), Pt.1, 1998, 3169-3177.
13. Norma Italiana UNI 11532-1:2018. Acustica – Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati – Metodi di programmazione e tecniche di valutazione. Requisiti generali.



Rockfon® è un marchio registrato del Gruppo ROCKWOOL.

-  [linkedin.com/company/Rockfon-as](https://www.linkedin.com/company/Rockfon-as)
-  [pinterest.dk/Rockfon](https://www.pinterest.dk/Rockfon)
-  [youtube.com/RockfonOfficial](https://www.youtube.com/RockfonOfficial)
-  [facebook.com/Rockfon-Italia-393027934220496](https://www.facebook.com/Rockfon-Italia-393027934220496)
-  [instagram.com/Rockfon_Official](https://www.instagram.com/Rockfon_Official)

Sounds Beautiful

02.2022 | Tutti i codici colore menzionati sono basati sul Sistema di classificazione NCS - Natural Colour System® di proprietà e utilizzati con licenza da NCS Colour AB, Stoccolma 2012, oppure sono basati sugli standard RAL. Documento non contrattuale. Modificabile senza preavviso. Credito foto: Rockfon, D.R.



Rockfon

ROCKWOOL Italia S.p.A.
Via Antonio Canova, 12 20145 Milano
Tel.: +39 02.346.13.1
Fax.: +39 02.346.13.321
E-mail: info@rockfon.it
www.rockfon.it