

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Edile – Architettura

Corso di Laurea Magistrale in Gestione del Costruito



LA PROGETTAZIONE SUL COSTRUITO

Il problema dell'isolamento acustico

IL CASO DI STUDIO DELL'EDIFICIO "NORD"

DEL POLITECNICO DI MILANO

Relatore: prof. Bruno DANIOTTI

Co-relatore: ing. Marcello BRUGOLA

Tesi di Laurea di:

Alessio MINA

Matr. 801381

Marco ALDRIGHETTI

Matr. 804961

Anno Accademico 2013/2014

Sommario

1. Abstract	5
2. Il processo edilizio sul costruito	8
2.1. L'intervento sul costruito	8
2.2. Il concetto di qualità edilizia	12
2.3. Esigenze, requisiti, prestazioni	14
2.4. L'approccio processuale	17
2.5. Introduzione sulle fasi gestionali di un intervento sul costruito	18
2.6. La qualità edilizia e il legame con l'acustica	32
2.6.1. Perché è importante l'acustica	32
3. Introduzione all' Acustica	34
3.1. Definizioni	34
3.2. Grandezze fisiche di riferimento.....	43
3.3. Fono isolamento: principi generali	47
3.3.1. Coefficiente di trasmissione	49
3.3.2. Potere fonoisolante.....	49
3.3.3. Teoria della trasmissione per il singolo pannello.....	50
3.3.4. Comportamento acustico di una parete semplice	51
3.3.5. Risonanza strutturale	55
3.3.6. Legge della massa	57
3.3.7. Frequenza di Coincidenza.....	59
3.3.8. Divisori multistrato.....	59
3.3.9. Connessioni Strutturali.....	60
3.3.10. Connessioni per punti o per Linea.	62
3.3.11. Problemi di rapporto area-perimetro	65
3.3.12. Problemi di angoli retti.....	65
3.3.13. Consigli utili per il progettista	66
3.4. Fono assorbimento: principi generali	68
3.4.1. Proprietà fondamentali	68
3.4.2. Assorbimento per porosità.....	70
3.4.3. Effetti dello spessore del materiale assorbente	73
3.4.4. Effetto della distanza del materiale assorbente dalla parete.....	74
3.4.5. Effetti della densità dell'assorbitore	75
3.4.6. Assorbimento per risonanza di cavità	76
3.4.7. Assorbimento per risonanza di membrana	78
3.4.8. Materiali fonoassorbenti	81
3.4.9. Incremento del potere fonoisolante	82
4. Stato dell'arte e quadro di riferimento per l'acustica	87
4.1. Premessa sul quadro normativo di riferimento.....	87
4.2. Termini e definizioni di orientamento (UNI EN ISO 16283-1:2014).....	91
4.3. Principali esposti normativi	97

4.4.	Nuovi orizzonti normativi	106
4.5.	Sintesi evolutiva della legislazione Italiana ed Europea	111
5.	Caso studio: edificio 2 Politecnico di Milano.....	119
5.1.	Edificio n°2 - "Bruno Finzi"	119
5.1.1.	Cenni storici e collocazione edificio	119
5.1.2.	Modifiche architettoniche nel corso degli anni	122
5.1.3.	Descrizione elementi tecnici	128
5.2.	Problematiche acustiche	130
5.2.1.	Riscontro dis-comfort acustico	130
5.2.2.	Esigenze della committenza	131
6.	Rilievo acustico pre- intervento	132
6.1.	Introduzione al rilievo acustico	132
6.2.	Riferimenti normativi per la misura in laboratorio ed in opera delle prestazioni acustiche di materiali e componenti	133
6.2.1.	Caratteristiche tecniche della strumentazione	146
6.3.	Prove acustiche rumori aerei	151
6.3.1.	Descrizione prova	152
6.3.2.	Risultati riscontrati	166
6.3.3.	Prove acustiche rumori da calpestio	170
7.	Progettazione acustica	170
7.1.	Obiettivi della progettazione	170
7.2.	Soluzione 1A e 1B	171
7.3.	Soluzione 2	181
7.4.	Soluzione 3	183
8.	Valutazione e scelta della soluzione migliore... 185	
8.1.	Metodo di valutazione	185
8.2.	Considerazioni economiche	186
8.3.	Tempistiche legate all'intervento	193
8.4.	Specifiche tecniche	198
8.5.	Valutazione finale	208
9.	Conclusioni	211
10.	Ringraziamenti	213
11.	Bibliografia	215
12.	Indice Figure	217
13.	Indice tabelle	221
14.	Indice grafici	222
15.	Indice Allegati	222

1. Abstract

Il contenuto del seguente elaborato nasce dall'esperienza condivisa durante la nostra fase di tirocinio curricolare svolto presso gli uffici AGIS (Area di Gestione Infrastrutture e Servizi) del Politecnico di Milano. Grazie alla supervisione ed alla collaborazione del Dott. Marco Iridile, tutor aziendale del nostro stage, abbiamo avuto modo, nelle fasi preliminari, di visitare locali, uffici, aree tecniche della sede di piazza Leonardo da Vinci del Politecnico ed apprendere le modalità di gestione del patrimonio immobiliare.

Durante la fase di "ispezione" abbiamo riscontrato, parlando con gli utenti dei vari uffici, alcune problematiche di questi spazi, interessandoci principalmente agli edifici più antichi.

Durante un incontro programmato con il dott. arch. Gennaro Leanza (dirigente AGIS), siamo venuti a conoscenza della necessità da parte del Politecnico di intervenire a breve sull'edificio n°2, uno dei fabbricati storici che compone il "Campus Leonardo". Più precisamente, la necessità manifestata dal Dott. Leanza, è quella di intervenire per riqualificare alcuni spazi all'interno del padiglione Nord. Questi spazi saranno prossimi, infatti, ad ospitare le presidenze di ingegneria e necessiteranno quindi di alcuni interventi edilizi.

Accolta la proposta, e visti i tempi ristretti imposti dalla direzione lavori, abbiamo condotto una breve indagine, grazie alla disponibilità dei precedenti fruitori dei locali, i quali si sono gentilmente sottoposti a brevi interviste che ci hanno confermato le carenze prestazionali da noi preventivamente riscontrate.

Il problema maggiormente segnalato riguarda il comfort acustico dei locali. Tale problema è conseguenza di una partizione realizzata nei primi anni '90 in seguito alla costruzione di un solaio a divisione del piano terra, che creò di fatto un "soppalco". Perimetralmente, in corrispondenza delle finestre, gli ambienti sono separati da questa partizione, troppo esile, che offre uno scarso isolamento acustico tra i due livelli.

Dopo aver analizzato con il dott. Furfaro Serranò (building manager dell'intervento) i risultati emersi dalla nostra analisi si è proceduto allo svolgimento di un rilievo acustico dei locali interessati, ricavando i dati di partenza per poter poi procedere all'elaborazione di un progetto di intervento e verificando così la veridicità delle impressioni dei precedenti fruitori dei locali.

Fortunatamente il prof. Moschioni, docente del Politecnico di Milano e titolare dell'azienda che ha svolto tali misurazioni, è riuscito in breve tempo a consegnarci gli esiti del rilievo, così da poter velocemente partire con i lavori di progettazione.

Successivamente, con l'aiuto del Professor Bruno Daniotti (Relatore di questa tesi) abbiamo avuto modo di approfondire le teorie di

base dell'acustica e di conoscere ed incontrare l'Ingegnere Marcello Brugola, specialista in acustica con un'esperienza ventennale nel campo dell'edilizia. (Co-relatore di tesi).

Facendoci guidare dall'ing. Brugola abbiamo sviluppato tre soluzioni tecnologiche con materiali opportuni, che potessero soddisfare le brevi tempistiche di intervento richieste dalla Committenza, cercando di migliorare il più possibile l'isolamento acustico della partizione senza necessità di pesanti interventi sulla struttura esistente.

Quest'ultima necessità, dettata principalmente da aspetti economici, ha infatti condizionato non poco le scelte progettuali. Dopo aver presentato le tre diverse soluzioni da noi studiate, abbiamo scelto la più adatta per il nostro caso di studio seguendo i parametri fondamentali forniti dall'AGIS.

L'esperienza da noi vissuta in fase di cantiere ci ha mostrato quali siano i punti di forza di una buona gestione ed organizzazione del processo edilizio, con particolare attenzione alle fasi critiche che condizionano il risultato finale.

2. Il processo edilizio sul costruito

2.1. L'intervento sul costruito

Con la locuzione "Intervenire sul costruito" si fa riferimento ad un insieme articolato di approcci concettuali e di azioni volte alla conservazione e alla trasformazione dei beni edilizi esistenti. Il termine "intervento", non deve essere interpretato in senso restrittivo, riferendosi ad attività di carattere tecnico-operativo. Queste, infatti, rappresentano solamente l'azione finale di un processo, caratterizzato da complesse operazioni ed azioni di carattere analitico, decisionale, organizzativo e programmatico, progettuale, economico e finanziario ed, in ultimo, anche esecutivo.

In riferimento alla norma UNI 11151, tali azioni, si collocano all'interno del processo edilizio sul costruito definito come processo relativo agli interventi che riguardano beni edilizi già esistenti. *Consiste nella sequenza organizzata di fasi che portano dall'accertamento delle esigenze della committenza/utenza al loro soddisfacimento, dall'accertamento delle prestazioni in essere al loro mantenimento/miglioramento, dall'individuazione di altri valori del bene alla loro conferma e/o incremento. Tali fasi sono la programmazione, la progettazione, l'esecuzione dei lavori fino alla definizione del successivo programma di gestione.*

Sempre in riferimento a quanto contenuto nella norma UNI, *il processo edilizio sul costruito si organizza per programmi complessi e può essere di tipo discontinuo o continuo. Nel primo caso esso definisce attività, interventi e loro relazioni che riguardano il bene edilizio per intervalli di tempo limitati e conclusi. Nel secondo caso esso definisce attività, interventi e loro relazioni che riguardano il bene edilizio lungo tutto il suo ciclo di vita e ammette variazioni di obiettivi, di osservazioni, di tipi e modi di intervento già programmati per il lungo periodo.*

L'intervento sul costruito, non coincide con l'esecuzione dei lavori su un oggetto edilizio, ma va considerato e pensato in relazione ad una dimensione più vasta, che trova nella fase conoscitiva, il momento fondamentale per l'individuazione e la definizione delle strategie e dei contenuti del progetto di intervento e, di conseguenza, per le successive azioni operative. [4]

Si tratta di una fase conoscitiva che investe molteplici piani di lettura:

- Contesto del materiale costruito: la finalità è quella di scoprire e porre in evidenza potenzialità, caratteristiche tecniche, condizioni di stato e di funzionamento, valori economici, culturali, simbolici;

- Contesto dei modelli d'uso: la finalità è quella di interpretare le esigenze di singoli e della collettività che direttamente o indirettamente fruiscono o hanno fruito dell'oggetto edilizio;
- Contesto ambientale, nel quale l'edificio si colloca in termini di risorsa materiale;
- Contesto operativo ed esecutivo, dove la finalità è quella di conoscere, rispetto allo specifico oggetto edilizio e alla sua localizzazione, le tecniche e le risorse materiali (uomini prodotti e sistemi, componenti e mezzi d'opera) ed economico-finanziarie disponibili e più appropriate.

Il progetto dell'intervento sul costruito, quindi, non si definisce in modo univoco, partendo da un'analisi semplicemente tecnica delle condizioni del bene edilizio, ma si caratterizza sulla base delle capacità di analizzare e porre in relazione molte variabili. Fondamentale, all'interno del processo edilizio sul costruito, è dunque la **pianificazione** ed il **coordinamento** delle attività. Va aggiunto, infine, che concepire il progetto dell'intervento sul costruito all'interno di uno schema procedurale composto da più fasi e secondo un approccio interdisciplinare, significa operare entro un processo circolare e ricorsivo, dove ad ogni contributo e ad ogni livello di approfondimento, di verifica e di simulazione dei fattori e dei fenomeni considerati vengono ridefinite, perfezionate ed ottimizzate le possibili soluzioni elaborate.

Il processo edilizio sul costruito, a differenza dei processi di produzione industriale, si distingue per alcune particolarità che lo rendono significativamente originale ma, proprio per questo, critico. Infatti, mentre la maggior parte dei prodotti e dei beni edilizi di produzione industriale vengono prima realizzati, poi selezionati e quindi acquistati dai rispettivi compratori (è il caso di arredi, automobili, elettrodomestici, utensili, ecc.), il prodotto edilizio non esiste come bene d'uso se non dopo la costruzione (o il suo recupero, in caso di un edificio già esistente), quindi chi avvia un processo di costruzione o riuso, si affida a un progetto attraverso il quale viene in qualche modo prefigurato l'oggetto acquistato e del quale si ha la speranza che possa venire utilizzato con modalità tali da dare efficaci risposte alle aspettative. [3]

Chi gestisce il processo edilizio, cioè il committente, in genere non è un operatore professionale, ma un individuo che nella maggior parte dei casi, entra una sola volta nella vita in questo meccanismo e per questo è costretto a delegare gran parte dei compiti tecnici ad una squadra composta da diversi operatori che dovrebbero essere in grado di supportarlo. Questo "team", composto da progettisti, costruttori, produttori di materiali, installatori di impianti, ecc., non sarà facile da controllare da quanto, a differenza di quanto avviene in un processo industriale stabile e collaudato, in questi casi si tratta quasi sempre di organizzazioni indipendenti che si trovano ad operare in collaborazione, per un periodo di tempo

limitato, cioè fino alla conclusione dei lavori, e dove il luogo di produzione, il cantiere, per necessità, cambia continuamente. Qui sta la causa principale delle incertezze operative e dei conflitti che spesso caratterizzano il processo edilizio.

2.2. Il concetto di qualità edilizia

Nei processi di intervento sul costruito, come in quelli sul nuovo, la progettazione è un'attività complessa, orientata al raggiungimento dei deversi obiettivi, essenziale per garantire gli attesi risultati qualitativi. La più recente normativa definisce la qualità come "grado in cui un insieme di caratteristiche intrinseche soddisfa i requisiti". La qualità può quindi essere definita come capacità di un prodotto di rispondere alle esigenze espresse o implicite dell'utente e della collettività. [1]

È importante definire che il termine "qualità" non ha lo stesso significato di "eccellenza", a differenza di quanto si usa nel linguaggio comune. Quando, infatti, noi pensiamo ad un prodotto di qualità in genere ci riferiamo ad un prodotto caratterizzato da elementi intrinsecamente qualitativi (per esempio le velocità, la potenza, le dotazioni in una automobile).

La normativa, invece, fa riferimento alle capacità dell'oggetto o del prodotto di rispondere ai requisiti, e quindi ad esigenze specifiche. La qualità edilizia, quindi, è la capacità di un oggetto

edilizio di rispondere alle esigenze degli utenti ai quali tale oggetto è destinato.

Misurare la qualità edilizia però non è facile. In ogni contesto, infatti, si possono evidenziare potenzialità qualitative le cui manifestazioni dipendono in larga misura dalla percezione individuale e collettiva dei fruitori. In questa logica, la definizione di qualità, trova giusta applicazione nel cosiddetto **approccio esigenziale-prestazionale**.

Ciò presuppone, come detto in precedenza, che ogni attività progettuale richieda un'attenta analisi dei bisogni dell'utenza, che i bisogni vengano espressi in esigenze e requisiti misurabili e che l'attività progettuale, per garantire il raggiungimento di almeno minimi livelli qualitativi, sia in grado di dare risposte positive alle esigenze dell'utenza attraverso un prodotto edilizio che offra prestazioni commisurabili con i requisiti.

Negli interventi sul costruito, il significato di qualità appare ancora più centrale e critico, proprio perché l'attività conoscitiva richiede capacità di leggere sull'edificio e sul contesto, il complesso dei "valori" in esso rappresentati (culturali, economici, d'uso) che influiranno in modo determinante sulle successive decisioni di progetto.

La fase progettuale del processo che raccoglie e correla queste informazioni e le traduce in un preciso quadro di riferimento per le

successive operazioni di progettazione, è la cosiddetta fase di metaprogettazione.^[2]

La metaprogettazione di un intervento non può essere impostata e attuata in maniera autonoma e indipendente da parte del progettista, ma deve necessariamente inquadrarsi e risultare compatibile con le leggi e le norme che ciascun paese emana per programmare, regolare e controllare i processi produttivi nei vari settori socioeconomici che interessano la collettività nazionale.

Da qui ne consegue che le informazioni metaprogettuali per gli interventi edilizi devono anche dedursi dal contesto normativo operante nel paese.

2.3. Esigenze, requisiti, prestazioni

L'approccio esigenziale è alla base delle attuali strategie per la qualità in edilizia. ^[1]

Nato in edilizia negli anni settanta, doveva rispondere essenzialmente alla complessità della funzione dell'abitare. In sintesi, era la concezione nuova delle attività degli operatori, primi fra tutti committenti e progettisti, che poneva le esigenze degli utilizzatori come riferimento iniziale conoscitivo ed operativo dei processi edilizi, e contemporaneamente come obiettivo finale delle operazioni realizzate, in termini di soddisfacimento delle esigenze stesse. Era questa, un'anticipazione di fondamentale importanza

della moderna strategia della qualità, che vede, infatti, nel soddisfacimento di esigenze, il fine ultimo delle attività produttive.

Ogni oggetto edilizio, che sia semplice o complesso, deve essere in grado di dare "risposte" a una serie di quesiti ed attivare determinati comportamenti, indipendentemente dalla sua forma esteriore e dai materiali dei quali è costituito. Questi obiettivi, sono il soddisfacimento delle esigenze.

Le esigenze possono essere espresse da singoli individui, o più generalmente, dalla società nel suo complesso, e possono inoltre esse esplicite o implicite. Le esigenze sono molteplici e alcune possono essere facilmente quantificabili, come per esempio quelle legate al benessere, altre meno, come la fruibilità.

È necessario non tralasciare che le esigenze si modificano con il tempo in relazione ai modelli abitativi, o di uso ma anche a causa di innovazioni tecnologiche, che incidono su l'obsolescenza, per esempio, delle dotazioni impiantistiche degli edifici.

Il complesso delle esigenze, come nel caso studio che andremo ad esporre, possono trasformarsi in specifiche richieste nei confronti della progettazione, della produzione e del funzionamento delle opere edilizie. Queste richieste di prestazioni sono i così detti **requisiti** e possono essere riferiti a spazi componenti edilizi o modelli organizzativi.

I requisiti possono essere definiti, quindi, come le richieste rivolte ai componenti edilizi perché questi abbiano caratteristiche tali da

soddisfare determinate esigenze, in condizioni di uso prefissate ed in presenza di definiti e specifici fattori esterni. Essi non possono essere sotto forma di semplici dichiarazioni, ma devono essere quantificati ed espressi attraverso specifiche **prestazioni**.

Le prestazioni sono i comportamenti specifici che i vari componenti sanno esprimere in esercizio, l'effettiva risposta ai requisiti di progetto, anche in questo caso misurabile per quanto possibile. Spetta al progettista indicare le soluzioni tecniche più adatte a dare risposta ai requisiti. Per esempio, in riferimento all'utilizzabilità di un locale (requisito di fruibilità), non è importante che questo abbia una dimensione definita da una norma (per esempio sup. camera matrimoniale 14mq) , è importante che in esso possano essere svolte le attività previste. Quindi più importanti delle dimensioni della stanza sono le caratteristiche spaziali, la forma la collocazione delle porte e finestre, la presenza di ulteriori vincoli che possono limitarne l'uso, ecc.

Da qui ne scaturisce l'importanza dei **capitolati prestazionali**, i quali, a prescindere da forme, dimensioni e materiali per definire le caratteristiche che dovranno possedere gli edifici, si limitano ad esplicitare i requisiti che gli spazi, componenti e materiali devono possedere per consentire il soddisfacimento dei bisogni.

Si desume quindi che il grado di qualità tipologica è funzione delle molteplici esigenze dell'utenza e dei nuovi modelli di consumo dell'alloggio, nonché funzione di "nuove" prestazioni richieste e

direttamente collegabili a problematiche, che vanno dalla necessità di una adeguata manutenzione e quindi di manutenibilità degli elementi tecnici ad una attenzione programmata nella scelta dei materiali e dei sistemi che definiscono e delimitano, rendendo significativa lo spazio residenziale.

Riqualificare gli edifici significa quindi renderla significativa in relazione allo stato attuale del quadro esigenziale anche attraverso un'attenzione alla flessibilità, cioè al concetto di modificabilità nel tempo. La flessibilità tipologica, spaziale, distributiva, supportata dalla flessibilità impiantistica, strutturale e tecnologica è quindi consentita dal grado di flessibilità fornita dai componenti, semi componenti e/o semilavorati che compongono l'organismo edilizio.

La riqualificazione edilizia necessita quindi di una strategia di progetto all'interno della quale, oltre all'affermazione che il progetto rappresenti il soddisfacimento dei bisogni e espressi o impliciti.

2.4. L'approccio processuale

È nostra volontà sottolineare in questa parte introduttiva l'importanza di un approccio processuale integrato tra tutte le fasi decisionali, esecutive e gestionali di un'opera edilizia. La norma UNI 10838 definisce il processo edilizio come " sequenza organizzata di fasi che portano dal rilevamento delle esigenze dell'utenza di un bene edilizio, al loro soddisfacimento in termini di progettazione,

produzione, costruzione e gestione dell'edificio". Questa definizione risulta perfettamente in linea con il concetto di approccio processuale integrato, sopra citato, il quale implicitamente, coinvolge la qualità e la sostenibilità nelle opere edilizie. [4]

È importante osservare che qualità e sostenibilità sono attenzioni che devono introdursi nell'intero iter decisionale degli interventi edilizi.

2.5. Introduzione sulle fasi gestionali di un intervento sul costruito

Prima di definire nello specifico le fasi da seguire per una corretta gestione di un intervento sul costruito è necessario fare riferimento al significato di processo edilizio precedentemente introdotto, cioè, quella sequenza organizzata di fasi che portano dal rilevamento delle esigenze della "committenza-utenza" di un bene edilizio al loro soddisfacimento, attraverso la progettazione, la produzione, la costruzione e la gestione del bene stesso. Il processo edilizio si può riferire ad interventi di nuova costruzione o, come nel nostro caso, a interventi sul costruito. [5]

Il processo edilizio per interventi sul costruito riguarda la realizzazione di trasformazioni di beni edilizi già esistenti e consiste nella sequenza organizzata di fasi che portano dal rilevamento delle esigenze, appunto, della "committenza-utenza" al loro soddisfacimento attraverso il rilievo delle prestazioni e dei valori di un bene esistente,

la progettazione e la trasformazione (demolizione, costruzione, ricostruzione) per la qualificazione o il recupero del bene stesso e la gestione del bene rinnovato per la conservazione della sua qualità. Le fasi processuali degli interventi edilizi sia di nuova costruzione che per interventi sul costruito, sono:



Grafico 1 - Successione delle fasi nel processo edilizio

PROCESSO DECISIONALE (progettazione)

Insieme strutturato delle fasi processuali che precedono la realizzazione dell'intervento e ne definiscono gli obiettivi, lo sviluppo meta progettuale, lo sviluppo progettuale e la programmazione.

Che sia un progetto di nuova costruzione o di interventi sul costruito, il progetto, deve essere redatto secondo tre livelli di definizione: preliminare, definitivo ed esecutivo.

Il **Progetto Preliminare** stabilisce i profili e le caratteristiche più significative degli elaborati dei successivi livelli di progettazione, in funzione delle dimensioni economiche e della tipologia dell'intervento.

È composto dai seguenti elaborati:

- Relazione illustrativa:
 - Descrizione dell'intervento da realizzare;
 - Illustrazione delle ragioni della scelta progettuale e riferimento ad altre possibili soluzioni;
 - Esposizione della fattibilità dell'intervento (studio di pre-fattibilità ambientale, esiti delle indagini, vincoli);
 - Disponibilità delle aree o degli immobili da utilizzare;
 - Cronoprogramma delle fasi attuative (tempi massimi di svolgimento delle attività di progettazione).
- Relazione tecnica:
 - Sviluppo degli studi tecnici connessi alla tipologia dell'intervento da realizzare;

- Indicazione di massima dei requisiti e delle prestazioni che devono essere riscontrate nell'intervento.
- Studio pre-fattibilità ambientale:
 - Verifica di compatibilità dell'intervento con piani paesaggistici, territoriali e urbanistici;
 - Studio degli effetti dell'intervento sulle componenti ambientale sulla salute dei cittadini;
 - Illustrazione della scelta progettuale in funzione della minimizzazione di eventuali interventi di ripristino/riqualificazione ambientale e stima dei costi;
 - Indicazione criteri tecnici adottati per assicurare il rispetto delle norme di tutela ambientale.
- Indagini geologiche, idrogeologiche e archeologiche preliminari;
- Planimetria generale e schemi grafici;
- Prime indicazioni e disposizioni per la stesura dei piani di sicurezza;
- Calcolo sommario delle spese: sulla base dei costi standardizzati o effettuando un computo metrico-estimativo di massima con prezzi unitari desunti dai prezziari o listini ufficiali vigenti nell'area interessata.

Il **Progetto Definitivo**, redatto sulla base delle indicazioni del Progetto Preliminare approvato, contiene tutti gli elementi per il rilascio della concessione edilizia, dell'accertamento di conformità urbanistica o di un altro atto equivalente.

È composto dai seguenti elaborati:

- Relazione descrittiva:
 - Descrizione dell'intervento da realizzare;
 - Criteri utilizzati per tutte le scelte progettuali;
 - Aspetti riguardanti la topografia, la geologia, etc.;
 - Presenza di eventuali cave o discariche;
 - Soluzioni per il superamento di barriere architettoniche;
 - Eventuali variazioni rispetto al progetto preliminare;
 - Eventuali opere di valorizzazione architettonica;
 - Tempo per la redazione del progetto esecutivo, aggiornando in caso quello indicato nel progetto preliminare.

- Relazione geologica, geotecnica, idraulica, idrogeologica:
 - Caratteristiche fisiche del suolo;
 - Aspetti stratigrafici, strutturali, idrogeologici e geomorfologici;

- Il comportamento meccanico del terreno interessato dall'intervento in assenza e in presenza delle opere;
- Studio delle acque meteoriche, superficiali, sotterranee;
- Indicazioni delle fonti dalle quali provengono gli elementi elaborati.
- Relazioni tecniche specialistiche;
- Rilievi piano altimetrici e studio di inserimento urbanistico;
- Elaborati grafici (principali caratteristiche opere in progetto);
- Studio di impatto ambientale o studio di fattibilità ambientale, redatto secondo la normativa di riferimento;
- Calcoli preliminari delle strutture e degli impianti;
- Disciplinare descrittivo e prestazionale degli elementi tecnici:
 - Descrizione delle caratteristiche e delle dimensioni dell'intervento;
 - Descrizione delle prestazioni tecniche dei materiali e dei componenti previsti nel progetto.
- Piano particellare di esproprio;
- Computo metrico estimativo;

- Quadro economico.

Il **Progetto Esecutivo** ha carattere ingegneristico e definisce in ogni particolare architettonico, strutturale ed impiantistico, l'intervento da realizzare (è redatto nel pieno rispetto del Progetto Definitivo).

È composto dai seguenti elaborati:

- Relazione generale:
 - Descrive nel dettaglio criteri utilizzati per tutte le scelte progettuali e per la verifica dei livelli qualitativi di sicurezza;
 - Descrive nel dettaglio i particolari costruttivi;
 - Descrive nel dettaglio indagini, rilievi e ricerche effettuate per ridurre, in corso di esecuzione, la possibilità di imprevisti;
 - Corredata da rappresentazione grafica delle attività costruttive e da diagramma con la pianificazione delle lavorazioni rispetto ad una sequenza logica e temporale.
- Relazioni specialistiche:
 - Illustrano puntualmente le soluzioni adottate dal punto di vista idraulico, geologico, geotecnico in sede di progettazione definitiva;
 - Se redatte in sede di Progetto Definitivo, esaminano tutte le problematiche riscontrate e le

verifiche analitiche effettuate in sede di progettazione esecutiva.

- Elaborati grafici compresi strutture e impianti;
- Calcoli delle strutture e degli impianti:
 - Sono riferiti alle condizioni di esercizio e alla destinazione specifica dell'impianto;
 - Contengono dimensionamento delle strutture;
 - Corredati da una relazione descrittiva delle modalità di calcolo per consentirne un'agevole lettura e verificabilità.
- Piano di manutenzione dell'opera e delle sue parti:
 - Prevede, pianifica e programma ogni attività di manutenzione dell'intervento al fine di mantenerne nel tempo le funzionalità, la qualità, l'efficienza e il valore economico.
 - È composto dal manuale d'uso, dal manuale di manutenzione e dal programma di manutenzione.
- Piano di sicurezza e di coordinamento;
- Computo metrico estimativo definitivo e quadro economico;
- Cronoprogramma;
- Elenco dei prezzi unitari ed eventuali analisi;
- Quantità di manodopera necessaria per l'intervento;

- Schema di contratto e capitolato speciale d'appalto
(regola il rapporto tra stazione appaltante e impresa).

PROCESSO ESECUTIVO (costruzione)

Il processo esecutivo è l'insieme di tutte le fasi operative che conducono alla realizzazione dell'intervento edilizio sulla base di quanto definito nelle fasi di progettazione e di programmazione.

La fase esecutiva di un procedimento può essere soggetta ad un'elevata molteplicità di agenti e situazioni in grado di incidere negativamente sulla organizzazione e sul funzionamento del cantiere in termini di tempi e costi di costruzione. Questi elementi di disturbo possono facilmente produrre un'attività non conforme alle previsioni progettuali con il riflesso negativo sia sulla qualità delle opere eseguite, sia sulla sicurezza di chi le deve eseguire.

Le "criticità operative" sono quindi le variabili del processo costruttivo che potrebbero, durante l'esecuzione dell'opera, comportare difficoltà realizzative o addirittura l'impossibilità ad eseguire determinate lavorazioni previste nel progetto. Per questo motivo è necessario sviluppare un'apposita analisi progettuale in modo tale da approcciarsi alla fase esecutiva del procedimento con un atteggiamento consapevole riguardo alla avvenuta risoluzione, o meno, delle problematiche analizzate. [7]

Le criticità operative possono essere suddivise in cinque classi, in riferimento a diversi ambiti. Dal contesto di cantierizzazione alle problematiche di produzione cantieristica, dalla progettazione

delle opere in senso lato alla sicurezza delle maestranze, includendo anche una sorta di classificazione degli imprevisti "prevedibili".

Le classi assumibili per tanto sono:

- Contestualizzazione dell'intervento: questa classe riguarda lo studio delle caratteristiche del luogo e dei dintorni in cui si dovrà allestire il cantiere temporaneo o mobile che hanno diretta influenza sui tempi e sui costi di esecuzione delle opere, e che posso determinare a priori, o condizionare, la morfologia del cantiere e alcune procedure di approvvigionamento, stoccaggio, movimentazione e lavorazione. I temi analizzati sono:
 - Vincoli territoriali;
 - Vincoli di superficie;
 - Vincoli aerei;
 - Vincoli di sottosuolo;
 - Vincoli antropici.
- Organizzazione della produzione: le criticità legate all'organizzazione della produzione sono riferite all'organizzazione produttiva necessaria per le singole lavorazioni e ai luoghi del cantiere in cui queste si svolgeranno. Questa classe di criticità riguarda quindi lo studio degli elementi del progetto funzionale, spaziale e tecnologico-produttivo del cantiere, che hanno diretta

influenza sui tempi e sui costi di esecuzione delle opere, analizzando le complessità di relazione, di assetto spaziale e di utilizzo delle risorse umane, tecniche e materiali. I temi analizzati sono:

- Consistenza spaziale del cantiere;
 - Subsistema logistico;
 - Subsistema infrastrutturale;
 - Subsistema impiantistico;
 - Subsistema degli apprestamenti;
 - Subsistema produttivo;
 - Organizzazione della manodopera.
-
- Specificità progettali: Questa classe di criticità è molto delicata in quanto è “alimentata” dall'attività di progettazione, nei suoi diversi livelli. Essa riguarda infatti l'analisi di quegli aspetti descrittivi e programmatori di un progetto che talvolta possono essere lasciati incompleti per difficoltà nel reperire dati utili al perfezionamento della progettazione. La consapevolezza dell'esistenza di carenze progettuali deve indurre ad una maggiore prudenza in sede di preventivazione dei tempi e dei costi di intervento. I temi analizzati sono:
 - Esaustività dell'attività di progettazione;

- Programmazione dei lavori.

- Sicurezza e salute dei luoghi di lavoro: questa classe di criticità non analizza i profili di sicurezza del cantiere dal punto di vista tecnico-operativo, bensì da quello gestionale, valutando l'impatto che la predisposizione dei presidi di prevenzione e protezione, l'adozione di particolari misure organizzative, nonché le specifiche esigenze di formazione, può avere sui tempi e sui costi di realizzazione delle opere. I temi analizzati in questa fase sono:
 - Sicurezza delle postazioni di lavoro;
 - Postazione dei lavoratori.

- Imprevisti: Questa classe di criticità inquadra gli imprevisti così detti "prevedibili", ovvero quelle situazioni estranee al cantiere in senso stretto che potrebbero comunque verificarsi senza generare particolare stupore. I temi analizzati sono:
 - Fattori climatici;
 - Guasti alle attrezzature.

PROCESSO GESTIONALE

Il processo gestionale viene definito come un insieme strutturato delle fasi operative che, a partire dall'entrata in servizio dell'organismo edilizio, si susseguono, allo scopo di assicurarne il funzionamento, fino all'esaurimento del suo ciclo funzionale ed economico di vita.

Le fasi processuali relative al processo gestionale sono:

- Progettazione gestionale: fase che elabora i piani di esercizio degli impianti tecnici ed i piani di manutenzione dell'organismo edilizio, tenuto conto di quanto elaborato nella progettazione funzionale-spaziale, tecnologica ed operativa;
- Programmazione gestionale: fase che sviluppa, secondo criteri di ottimizzazione, la sequenza temporale delle operazioni di esercizio degli impianti tecnici e di quelle di manutenzione, definite nella progettazione gestionale;
- Gestione corrente: fase che attiene alle attività che devono essere svolte per mantenere l'organismo edilizio in condizione ottimali di fruibilità, a prescindere dal decadimento delle sue prestazioni, sulla base delle istruzioni operative del programma gestionale relative alla controllabilità e alla pulibilità delle sue parti;

- Esercizio degli impianti: Fase che attiene alle attività che devono essere svolte per il corretto funzionamento degli impianti tecnici dell'organismo edilizio sulla base della programmazione gestionale;
- Manutenzione: Fase che raggruppa le attività di riparazione e/o di sostituzione delle parti dell'organismo edilizio per assicurarne nel tempo il corretto funzionamento, in base alla programmazione gestionale.

Le diverse tipologie di manutenzione si suddividono in:

- Manutenzione di emergenza o "accidentale": manutenzione non programmata a seguito di un guasto;
- Manutenzione a guasto avvenuto: manutenzione (programmata) eseguita a seguito di un guasto prevedibile non critico (usuale in edilizia);
- Manutenzione preventiva - predittiva di soglia: manutenzione programmata eseguita a età costante o a intervalli temporali costanti (es. verniciatura), stabiliti sulla conoscenza dei dati di durabilità (Es: man. Automobilistica) per guasti critici (Es: impermeabilizzazione in copertura);
- Manutenzione preventiva secondo condizione: manutenzione programmata eseguita a seguito del

raggiungimento di una condizione limite, valutata con ispezioni basate sulle schede diagnostiche, con frequenza basata sull'affidabilità, per guasti critici (Es: parti strutturali);

- Manutenzione di opportunità: manutenzione eseguita in anticipo rispetto al programma manutentivo per un'opportunità conveniente economicamente, in occasione di interventi manutentivi su altre parti dell'organismo edilizio.[6]

2.6. La qualità edilizia e il legame con l'acustica

2.6.1. Perché è importante l'acustica

Il rumore può essere causa di disturbo e di danno in più luoghi e circostanze, ma il luogo dove forse l'insorgere di questa forma di inquinamento suscita le più diffuse vivaci reazioni è l'ambiente domestico urbano. A determinare il disagio acustico che affligge ormai la maggior parte delle abitazioni cittadine concorrono molteplici fonti: da quelle esterne (traffico veicolare di ogni genere, attività industriali e commerciali, cantieri), a quelle interne all'edificio stesso (ascensori, impianti di riscaldamento, attività dei vicini), su molte delle quali risulta però assai spesso difficoltoso e complicato intervenire per ridurre, come andrebbe fatto, il disturbo all'origine.

Un'efficace e sperimentata alternativa è la realizzazione di fabbricati in grado di assicurare ad ogni singola unità abitativa una protezione acustica tale da porre le persone al loro interno totalmente al riparo da rumori indesiderati di qualsiasi provenienza. Ma affinché ciò avvenga occorre, in primo luogo, che il problema della qualità acustica degli edifici, a partire da ogni loro singolo componente, assuma fin dalla fase di progettazione il ruolo centrale che gli compete, cosa questa che risulta tuttora frequentemente disattesa o ignorata.

Sotto questo punto di vista, la finalità principale del prossimo capitolo è quindi quella di fornire un complesso sufficiente di conoscenze di base e di informazioni tecniche per affrontare in modo avvertito e consapevole i più importanti aspetti di questa delicata e, in termini di comfort, decisiva materia.

3.Introduzione all' Acustica

3.1. Definizioni

Acustica

(Dal greco, akouein, "udire"), termine talora utilizzato per indicare la scienza del suono in generale, ma più comunemente usato in riferimento agli aspetti architettonici connessi alla realizzazione di ambienti chiusi in grado di valorizzare al massimo l'ascolto del parlato e della musica. L'acustica degli edifici è un aspetto della scienza del suono piuttosto trascurato fino a tempi relativamente recenti. Anche se alcune osservazioni pertinenti sulla riverberazione dei suoni erano già state condotte da architetti dell'antica Roma, questi argomenti furono trattati rigorosamente dal punto di vista scientifico solo nel 1856, dal fisico statunitense Joseph Henry.

Moto ondulatorio

Meccanismo di trasporto di energia che non implica trasferimenti di materia. Sebbene non sia necessario che la materia si sposti da un punto a un altro durante la propagazione ondosa, molti tipi di moti ondulatori possono avvenire solo in presenza di materia. In ogni punto della traiettoria dell'onda ha luogo uno spostamento periodico, o oscillazione, intorno a una posizione media. Esempi di moto ondulatorio sono le vibrazioni delle molecole dell'aria, responsabili della propagazione del suono nell'atmosfera, e le onde

del mare dovute a oscillazioni delle molecole d'acqua. In ognuno di questi casi le particelle materiali oscillano intorno alla loro posizione di equilibrio, ed è solamente l'energia quindi che si muove con continuità in una sola direzione. Onde di questo tipo, ossia che si propagano con oscillazione di materia, sono dette meccaniche perché l'energia viene trasmessa attraverso un mezzo meccanico. Le onde elettromagnetiche, che consistono in variazioni periodiche dell'intensità del campo magnetico ed elettrico, possono invece propagarsi nello spazio vuoto.

Tipi di onde

Le onde si dicono trasversali o longitudinali a seconda che la direzione di oscillazione sia parallelo o perpendicolare rispetto alla direzione di propagazione. Un'onda longitudinale può essere solo meccanica: essa risulta infatti da successive compressioni (stati di densità e pressione massimi) e rarefazioni (stati di densità espressione minimi) del mezzo. Le onde sonore ne sono un esempio tipico. Esempi di onde trasversali sono invece quelle che si propagano lungo una corda tesa o le onde elettromagnetiche, come la luce, i raggi X, o le onde radio. La lunghezza d'onda è la distanza tra due creste successive per le onde trasversali, e la distanza tra due compressioni successive o due rarefazioni successive per le onde longitudinali.

La frequenza dell'onda è data dal numero di vibrazioni compiute in un secondo;

la velocità di propagazione è pari al prodotto della lunghezza d'onda per la frequenza; l'elongazione massima di una vibrazione per le onde meccaniche è detta ampiezza dell'onda;

mentre nel caso delle onde elettromagnetiche l'ampiezza rappresenta il valore più intenso del campo magnetico o del campo elettrico.

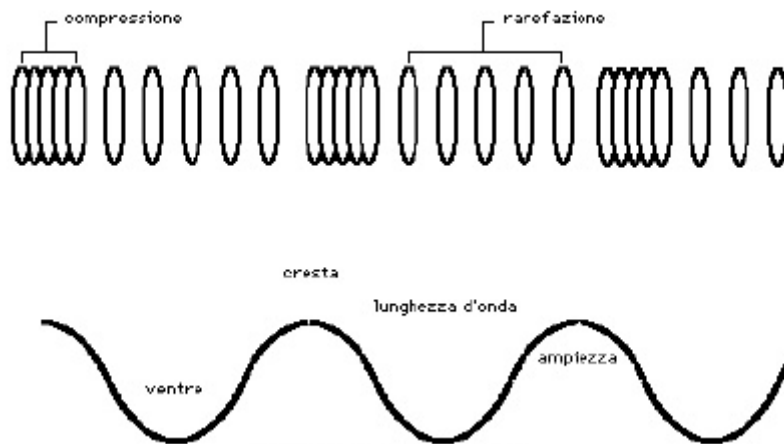


Figura 1 – Tipologia di onde: longitudinale (superiore) trasversale (inferiore)

Interferenza tra onde

Due impulsi che si propagano lungo una corda si sovrappongono, dando luogo a un unico impulso di ampiezza pari alla somma delle rispettive ampiezze. Perciò, due onde di uguale ampiezza che viaggiano in opposizione di fase, nell'istante della sovrapposizione, si annullano a vicenda (A: interferenza distruttiva), mentre due onde di uguale ampiezza che viaggiano lungo la corda con la

stessa fase generano un impulso di ampiezza doppia (B: interferenza costruttiva).

Onde stazionarie

Quando due onde con lunghezza d'onda e ampiezza uguali viaggiano alla stessa velocità nello stesso mezzo, si forma un'onda stazionaria. Ad esempio, se si annoda un'estremità di una corda ad un muro e si scuote l'altra estremità, si ha dopo poco la sovrapposizione dell'onda diretta e di quella riflessa dal muro. Ammesso che la riflessione sia perfettamente efficiente, l'onda riflessa risulta sfasata di mezza lunghezza d'onda rispetto all'onda diretta. Per il fenomeno dell'interferenza le oscillazioni della corda in ogni punto sono date dalla somma algebrica delle singole onde. I punti in cui i massimi dell'una incontrano i minimi dell'altra rimangono fermi, e prendono il nome di nodi. A metà strada tra un nodo e l'altro le onde si sovrappongono in fase, e l'ampiezza dell'onda risultante è il doppio di quella dell'onda diretta; tali punti si chiamano ventri. La corda risulta divisa dai nodi in una serie di tratti lungo ciascuno una lunghezza d'onda, entro i quali la corda oscilla trasversalmente. Le corde degli strumenti musicali generano onde stazionarie; una corda di violino, ad esempio, vibra generando un'onda stazionaria con i nodi agli estremi, simultaneamente a una con tre nodi di cui uno al centro, a un'altra con quattro nodi, e così

via. La vibrazione a due nodi produce la nota fondamentale, tutti gli altri modi di vibrazione generano le armoniche successive.

Suono

Fenomeno fisico di carattere ondulatorio che stimola il senso dell'udito. Benché siano percepibili soltanto vibrazioni sonore di frequenza compresa tra i 16 e i 20.000 hertz, il significato del termine suono è stato esteso dai fisici a fenomeni ondulatori che si verificano in mezzi fluidi o solidi e in campi di frequenza che cadono al di fuori della sensibilità dell'orecchio; in particolare, i suoni di frequenza superiore ai 20.000 hertz sono detti ultrasuoni. In base al diverso meccanismo di propagazione si distinguono onde trasversali e onde longitudinali; in entrambi i casi, le particelle materiali compiono oscillazioni o vibrazioni intorno alla posizione di equilibrio, ed è solo l'energia che si propaga e "viaggia" attraverso il mezzo. Si genera un'onda trasversale

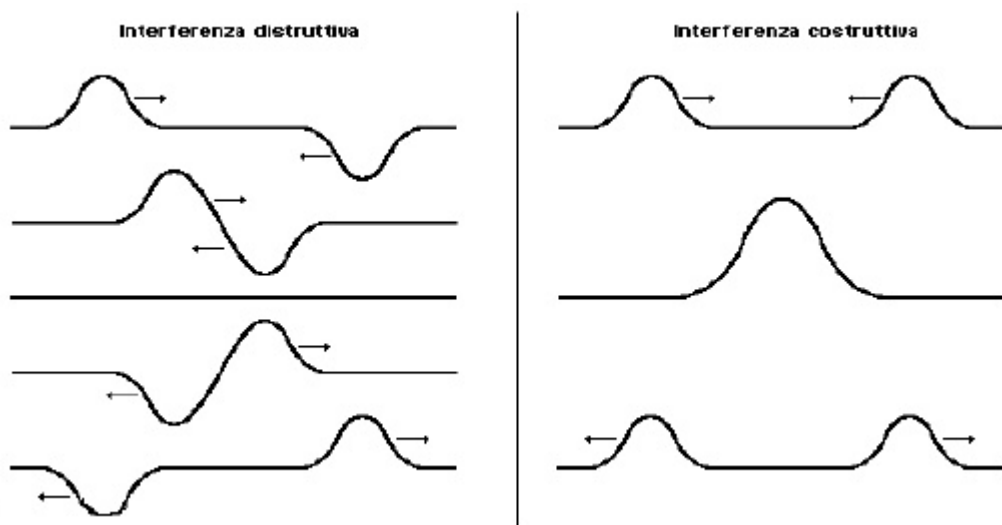


Figura 2 – Tipologie di interferenze

fornendo un impulso oscillatorio all'estremo di una corda fissata al capo opposto; mentre l'onda si propaga verso il punto fisso, nessuna porzione della corda si muove in direzione longitudinale ma, al contrario, le oscillazioni meccaniche avvengono in direzione perpendicolare alla direzione di propagazione. Anche le onde generate da un sasso lanciato in un lago sono onde trasversali; infatti, un turacciolo che galleggi vicino al punto in cui è avvenuta la perturbazione si muove, trasportato dalle molecole del liquido, in su e in giù, trasversalmente alla direzione di propagazione delle onde. Le onde sonore invece sono longitudinali: le molecole del mezzo in cui si propaga il suono si muovono parallelamente alla direzione di propagazione dell'onda. Un'onda sonora che viaggi attraverso l'aria non è altro che una successione di rarefazioni e compressioni di piccole porzioni d'aria; ogni singola molecola trasferisce energia alle molecole adiacenti e, dopo il passaggio dell'onda, ritorna pressappoco nella sua posizione iniziale.

Caratteristiche fisiche

Qualunque suono semplice, ad esempio una nota musicale, è descritto da: altezza, intensità e timbro; queste caratteristiche percettive corrispondono a grandezze fisiche proprie dell'onda associata quali, rispettivamente, frequenza fondamentale, ampiezza e spettro. Il rumore è un suono complesso, dato dalla sovrapposizione casuale di frequenze diverse, non armonicamente

correlate. Ogni strumento musicale produce una vibrazione caratteristica che si propaga nell'aria e nei mezzi materiali sotto forma di onda sonora. Le proprietà di quest'ultima definiscono il timbro di un suono. Così il diapason produce un suono puro, con un'onda perfettamente sinusoidale, mentre il violino genera suoni intensi con brusche oscillazioni e il flauto suoni caldi e schietti, con vibrazioni relativamente morbide. Un gong invece non produce vibrazioni regolari, ma casuali e spigolose, con timbro pressoché irriconoscibile.

Frequenza

La frequenza delle onde sonore è una misura dell'altezza del suono. Il Range di udibilità dell'orecchio umano è compreso tra i 20 e i 20.000 Hz. Ciò significa che, pur esistendo onde sonore che si propagano a frequenze più basse (infrasuoni) o più alte (ultrasuoni), noi non possiamo percepirle. Esistono diversi metodi per produrre un suono di determinata frequenza.

Velocità del suono

La velocità di propagazione di un'onda è data dal prodotto della lunghezza d'onda, cioè della distanza percorsa dall'onda in un periodo, per la frequenza delle oscillazioni; essa dipende dal mezzo di propagazione e, in uno stesso mezzo e alla stessa temperatura, è uguale per tutte le frequenze. Nei gas, nei liquidi e nei solidi

la velocità di propagazione del suono è inversamente proporzionale alla radice quadrata della densità e direttamente proporzionale alla radice quadrata del modulo di elasticità; dipende inoltre dal calore specifico. La velocità del suono nell'aria secca, alla temperatura di 0 °C, è di 331,6 m/s, ma aumenta al crescere della temperatura; a 20 °C, ad esempio, raggiunge il valore di 340 m/s; nell'acqua è poco minore di 1525 m/s a temperature ordinarie e cresce rapidamente all'aumentare della temperatura. Nel rame invece è di circa 3353 m/s a temperature ordinarie ma, a causa della diminuzione di elasticità, diminuisce all'aumentare della temperatura; infine nell'acciaio, materiale più elastico del rame, il suono si propaga a 4877 m/s.

Ampiezza

L'ampiezza di un'onda sonora rappresenta il massimo spostamento, rispetto alla posizione di equilibrio, delle molecole che costituiscono il mezzo di propagazione; al crescere dell'ampiezza dell'onda aumenta la forza con la quale viene colpito il timpano dell'orecchio e quindi l'intensità con cui il suono è percepito. Oltre che come elongazione massima delle molecole d'aria, è possibile definire l'ampiezza come massima differenza di pressione tra rarefazione e compressione, oppure in termini di energia, essendo questa grandezza proporzionale all'ampiezza dell'onda. In generale comunque l'intensità dei suoni si esprime in modo relativo, rispetto a un suono standard, e si misura in decibel.

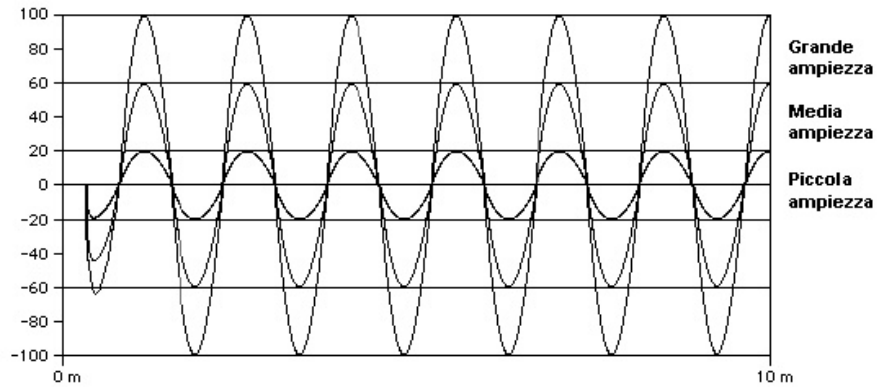


Figura 3 – Varie ampiezze dell'onda sonora

Intensità

La distanza cui un suono può essere percepito dipende dalla sua intensità, che è definita come il flusso medio di energia che, nell'unità di tempo, attraversa una superficie di area unitaria disposta perpendicolarmente alla direzione di propagazione. Nel caso di onde sferiche generate da una sorgente puntiforme, l'intensità varia in modo inversamente proporzionale alla distanza, purché siano trascurabili gli effetti della viscosità e le variazioni di temperatura, pressione, o umidità del mezzo di propagazione; in particolare, per le onde sonore nell'atmosfera tali effetti non sono marginali e, la legge, in condizioni normali, vale solo approssimativamente.

L'intensità del suono si misura in decibel (dB). Alla soglia di udibilità è attribuito il valore 0 dB; l'intensità di un mormorio risulta di circa 10 dB e il fruscio del vento tra le foglie si aggira intorno ai 20 dB. La scala delle intensità dei suoni è logaritmica, perciò ogni incremento

di 10 dB corrisponde a un aumento in intensità di un fattore 10: il fruscio delle foglie infatti è 10 volte più intenso dei mormorii.

Timbro

Una stessa nota, ad esempio il "la" nella scala diatonica del do maggiore, suonata con la stessa intensità da un pianoforte, un violino e un diapason, produce una sensazione uditiva diversa perché, pur avendo frequenza identica, ha nei tre casi timbro diverso. Mentre il "la", emesso dal diapason ha, con buona approssimazione, frequenza esattamente di 440 Hz, quello prodotto dal violino o dal pianoforte ha come componente di frequenza dominante quella fondamentale (di 440 Hz), ma contiene suoni di frequenze multiple: 880, 1320, 1760 Hz. L'intensità relativa di queste altre componenti, dette armoniche, determina il timbro della nota.

3.2. Grandezze fisiche di riferimento

La quantità di energia irradiata da una sorgente sonora nell'unità di tempo è denominata potenza sonora P_w (W). La potenza sonora (P_w) emessa da una sorgente è irradiata nel mezzo elastico, come l'aria, attraverso una determinata superficie S (o fronte d'onda) come lavoro dovuto al prodotto della forza di pressione p per la velocità di spostamento delle particelle v intorno al punto di equilibrio. La potenza sonora P_w può quindi essere correlata alla pressione sonora dall'equazione:

$$P_w = p \cdot (p/\rho c) \cdot S = (p^2/\rho c) \cdot S \quad (2.1)$$

Per una sorgente che irradia uniformemente in tutte le direzioni (mezzo isotropo), ovvero in campo libero [il campo sonoro si distingue idealmente in campo libero (spazio ideale privo di riflessioni) e campo diffuso (spazio perfettamente diffondente delimitato da superfici altamente riflettenti); situazioni intermedie vengono di volta in volta a determinarsi modificando la relazione 2.2], il fronte d'onda S è pari alla superficie di una sfera; alla distanza r dalla sorgente la potenza sonora sarà dunque pari a:

$$P_w = (p^2/\rho c) 4 \pi r^2 \quad (2.2)$$

Nella pratica le sorgenti sonore irradiano con potenze estremamente variabili che vanno dal valore della voce umana a livello di conversazione, pari a circa 10^{-6} W, al rumore di un aereo turbogetto pari a 104 W (v. Tabella 2).

Sia P_w (W) la potenza sonora irradiata da una sorgente sonora su un fronte d'onda S (m^2), sussiste allora la seguente relazione tra potenza sonora e intensità sonora I :

$$I = P_w / 4 \pi r^2 = p^2/\rho c \quad (W/m^2) \quad (2.3)$$

e quindi l'intensità è l'energia che, nell'unità di tempo, fluisce attraverso l'unità di area del fronte d'onda.

Mentre la frequenza discrimina la percezione dei suoni, ovvero, il loro tono, da gravi (bassa frequenza) ad acuti (alta frequenza), analogamente l'intensità discrimina i suoni da deboli a forti.

In campo libero, per la (2.3), si ha dunque la seguente relazione tra pressione sonora e intensità:

$$I = p \cdot v = p^2 / \rho c \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.4)$$

e per la (2.1) si ha che la pressione sonora, in campo libero, risulta così legata alla potenza:

$$p = (P_w \rho c / 4 \pi r^2)^{1/2} \quad (2.5)$$

Dalle relazioni suddette si evince che, in campo libero, la pressione sonora e l'intensità diminuiscono con il quadrato della distanza r : per il suono nell'aria, quindi, quando la distanza raddoppia l'ampiezza si riduce della metà. In un'onda piana invece la superficie del fronte d'onda rimane costante (ad es. nel rumore generato da un elettroventilatore all'interno di un condotto a sezione costante) e se non vi sono dissipazioni sulle pareti del condotto (ad es. materiale fonoassorbente) l'intensità non varia all'aumentare della distanza. In definitiva le principali grandezze acustiche sono le seguenti:

GRANDEZZE RIFERITE ALLA SORGENTE SONORA {POTENZA SONORA P_w (W)

GRANDEZZE RIFERITE AL CAMPO SONORO { INTENSITÀ I (W/m²)
PRESSIONE SONORA p (Pa)

Riprendiamo in esame una sorgente sonora costituita da un pistone che si muove con moto armonico (suono puro) all'estremità di un condotto di lunghezza infinita. [10]

La propagazione del suono avviene in tal caso per onde piane e, per mezzo elastico non viscoso, si può dimostrare che la quantità di energia per unità di volume o densità di energia sonora D trasferita dalla sorgente (il pistone) al mezzo è data dalla seguente relazione:

$$D = E/V = \rho v^2 \text{ (J/m}^3\text{)} \quad (2.6)$$

dove v è la velocità della superficie del pistone e (per onde piane in un mezzo non viscoso), anche della oscillazione delle particelle nel mezzo. Sostituendo la (2.1) nella (2.7) si ha:

$$D = p^2/\rho c^2$$

La densità energetica è anch'essa una grandezza riferita al campo sonoro anche se non trova nel seguito pratica applicazione. Nel corso delle precedenti osservazioni per comodità si è fatto di volta in volta riferimento a fronti di propagazione sonora costituiti da onde piane e sferiche:

mentre è evidente che nel caso di onde sferiche (tralasciando altri effetti di dissipazione di energia sonora che vedremo in seguito) l'intensità e la pressione diminuiscono con il quadrato della distanza, ciò non avviene per le onde piane; tuttavia nel caso che il rapporto $k = 2\pi r/\lambda \gg 1$ ovvero a distanza r dall'origine molto grande rispetto alla lunghezza d'onda, le onde sferiche si comportano come onde piane, per cui le relazioni formulate per quest'ultime risultano con buona approssimazione valide anche per sorgente sonora che irradia nello spazio; infine si rileva che se la sorgente è piccola rispetto al campo sonoro questa può essere considerata puntiforme o lineare nel caso di sorgenti di rumore da traffico.

3.3. Fono isolamento: principi generali

Si definisce **isolamento acustico** di una struttura che separa due ambienti la sua capacità di ridurre l'energia acustica che si propaga per via aerea dall'ambiente disturbante a quello ricevente. Quando un fronte d'onda incide sulla superficie di un divisorio, avvengono diversi fenomeni: l'energia che si propaga per via aerea viene trasformata in vibrazione meccanica forzata o risonante della struttura; l'energia meccanica si ritrasforma in parte in energia acustica che si propaga per via aerea (radiazione acustica riflessa o trasmessa); in parte in energia dissipata in calore e in parte in energia meccanica trasmessa per via solida ad altre strutture; quest'ultima può infine essere

nuovamente irradiata dalle strutture eccitate nell'ambiente di ricezione. [10]

Analiticamente si introducono i seguenti coefficienti:

- Coefficiente di dissipazione (δ): rapporto tra potenza sonora dissipata e potenza sonora incidente;
- Coefficiente di trasmissione (τ): rapporto tra potenza sonora trasmessa e potenza sonora incidente;
- Coefficiente di assorbimento (α): rapporto tra potenza sonora assorbita e potenza sonora incidente,

$$\alpha = \delta + \tau;$$

- Coefficiente di riflessione (r): rapporto tra potenza sonora riflessa e potenza sonora incidente,

$$r + \delta + \tau = r + \alpha = 1;$$

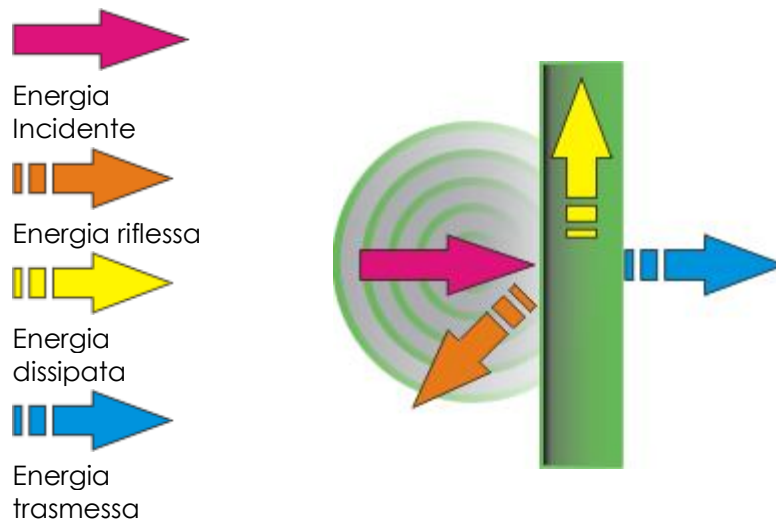


Figura 4 – Flussi di energia sonora in un divisorio rigido

3.3.1. Coefficiente di trasmissione

In generale, escludendo casi molto particolare, l'elemento divisorio acusticamente isolante presenta la medesima area sulle due superfici che si affacciano rispettivamente sugli ambienti da esso separati. Essendo l'intensità sonora definita come la potenza che fluisce attraverso una superficie di area unitaria perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda, il coefficiente di trasmissione τ può essere semplicemente espresso come rapporto tra intensità sonora trasmessa I_t e intensità sonora incidente I_i :

$$\tau(\theta) = \frac{I_t(\theta)}{I_i(\theta)}$$

3.3.2. Potere fonoisolante.

Si definisce potere fonoisolante R di una qualunque parete divisoria la grandezza logaritmica, espressa in decibel, data dalla relazione:

$$R(\theta) = 10 \log \frac{1}{\tau(\theta)} \text{ [dB]}$$

In tale relazione è indicata la dipendenza esplicita dall'angolo di incidenza, del quale è funzione il coefficiente di trasmissione $\tau(\theta)$, così da poter definire il potere fonoisolante in relazione alla modalità di incidenza dell'onda acustica sulla superficie della parete divisoria. Nel caso in cui il fronte acustico incida sulla parete in direzione normale alla superficie ($\theta=0$) si definisce il potere fonoisolante per incidenza normale.

3.3.3. Teoria della trasmissione per il singolo pannello

Qualunque struttura è composta da costituenti di base che possono essere identificati in pannelli, travi, giunti, ecc. dal punto di vista acustico, il primo gruppo da prendere in considerazione, per la loro capacità di accoppiarsi con l'aria, sono i pannelli. Si può definire con il termine di pannello qualunque elemento solido di cui una delle dimensioni, lo spessore, è nettamente inferiore alle altre due, che sono invece equiparabili tra di loro.

Le caratteristiche di trasmissione acustica di un pannello dipendono essenzialmente dalla sua geometria e da tre grandezze macroscopiche: **la massa, la rigidità e lo smorzamento**. Una struttura vibrante possiede infatti sia energia cinetica, associata alla massa, sia energia di deformazione (potenziale) legata alla rigidità, e sia la capacità di dissipare parte dell'energia da cui è eccitata. La risposta dinamica è data dalla sovrapposizione lineare dei singoli modi di vibrazione della struttura: è fondamentale la distribuzione dei modi nel dominio della frequenza e la densità modale del pannello, che oltre che dalle grandezze citate dipendono dalle condizioni vincolari della struttura. La trasmissione acustica è divisa in due tipologie:

- La trasmissione non risonante, che ha luogo quando l'energia sonora incidente pone in moto forzato la struttura senza

eccitarne i modi propri; è dominata dalle caratteristiche massive della struttura stessa;

- La trasmissione risonante, in cui sono eccitati i modi della struttura, che irradia a sua volta energia sonora; è dominata dallo smorzamento della struttura e dalla sua efficienza di radiazione.

3.3.4. Comportamento acustico di una parete semplice

La capacità di un divisorio di isolare acusticamente può essere dunque imputata intuitivamente a tre fattori: *la resistenza inerziale* che esso è in grado di opporre al movimento forzato che viene imposto dalla pressione acustica incidente; *la capacità di irradiare l'energia accumulata*; *la possibilità di dissipare parte dell'energia acustica*. [10]

Il primo è fisicamente dovuto al primo e al terzo principio della dinamica, ossia alla forza di reazione inerziale: $F = M * a$ che agisce in verso opposto alla forza applicata. Maggiore è la forza di inerzia, maggiore è l'isolamento acustico: quindi maggiore è la massa, maggiore sarà il potere fonoisolante; inoltre una crescita della frequenza nei sistemi armonici si ripercuote su un incremento di accelerazione, aumentando la forza d'inerzia e quindi il potere fonoisolante.

Il secondo è imputabile alle caratteristiche elastiche del muro, mentre il terzo è legato alle proprietà smorzanti del muro.

Il più semplice esempio di sistema a parametri concentrati che presenta l'azione delle tre grandezze sopra introdotte (al quale si può in prima approssimazione assimilare il comportamento di un pannello) è l'*oscillatore armonico smorzato*, costituito da una massa m (kg) sottoposta ad una forza armonica F (N), da una molla di rigidità k (N/m) e da un elemento dissipativo, avente costante di smorzamento b (kg/s).

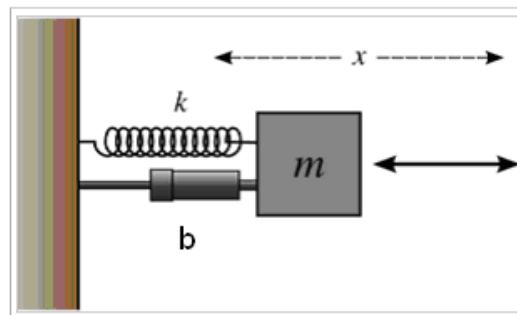


Figura 5 - l'oscillatore armonico smorzato

In tale contesto occorre aggiungere il cosiddetto *effetto coincidenza*, dovuto al fatto che nei solidi, diversamente che nei fluidi, possono propagarsi onde diverse da quelle longitudinali (queste onde sono di varia natura, ma le più importanti ai fini acustici sono quelle definite *flessionali*). Poiché nella realtà occorre tenere in considerazione i comportamenti a fronte di qualunque tipo di eccitazione, vengono di seguito esaminati i comportamenti di strutture tradizionalmente presenti nel campo edile.

Il suono può essere trasmesso attraverso le partizioni fra ambienti adiacenti secondo diversi percorsi strutturali, tra i quali si definisce *percorso diretto* quello che si verifica attraverso la partizione posta a tramezzo fra i due ambienti. In questo caso la trasmissione attraverso tale elemento di separazione dipende dalle seguenti caratteristiche:

- La frequenza del suono proveniente da un'ipotetica sorgente sonora posta nell'ambiente disturbante;
- La massa del componente di separazione (in particolare la massa superficiale, espressa in kg/m^2);
- Le condizioni di vincolo del componente di separazione rispetto alle strutture circostanti;
- Le frequenze di risonanza del componente di separazione.

Si definiscono invece *percorsi indiretti* quei percorsi secondari di trasmissione indotti dalle strutture adiacenti, come ad esempio dalle pareti dell'ambiente disturbante, che re-irradiano il suono nell'ambiente disturbato.

In altre parole, una misura di laboratorio dell'isolamento acustico (più correttamente *potere fonoisolante*) del componente posto a tramezzo fra due ambienti adiacenti può dare risultati molto diversi rispetto alla situazione reale, dove invece si verificano le cosiddette *trasmissioni laterali*, ossia le trasmissioni di energia sonora descritte sopra in termini di percorsi indiretti.

Naturalmente quando un tramezzo è caratterizzato da un basso potere fonoisolante (ad esempio $R_w = 35dB$) il problema delle trasmissioni laterali è pressoché trascurabile, in quanto la trasmissione del suono avviene quasi completamente attraverso il tramezzo stesso, ma quando il tramezzo assume considerevoli valori di R_w (ad esempio 50 dB, limite inferiore richiesto dalla legge italiana) occorre essere estremamente attenti nella valutazione delle trasmissioni laterali.

Infine, per un pannello "omogeneo" (ossia con caratteristiche analoghe su tutta la sua sezione), il comportamento può essere descritto in funzione della frequenza del suono incidente:

- *Prima regione delle frequenze di interesse*: il comportamento dipende dalla rigidità del pannello e dalle risonanze strutturali;
- *Seconda regione delle frequenze di interesse*: il comportamento dipende unicamente dalla massa del pannello, ed è per questo che in questa regione di frequenze si parla di *legge della massa*;
- *Terza regione delle frequenze di interesse*: il comportamento dipende dalla rigidità del pannello. Questa regione inizia con una frequenza denominata *frequenza critica* (o *frequenza di coincidenza*), che può essere determinata teoricamente e dipende dal tipo di materiale considerato e dallo spessore del pannello.

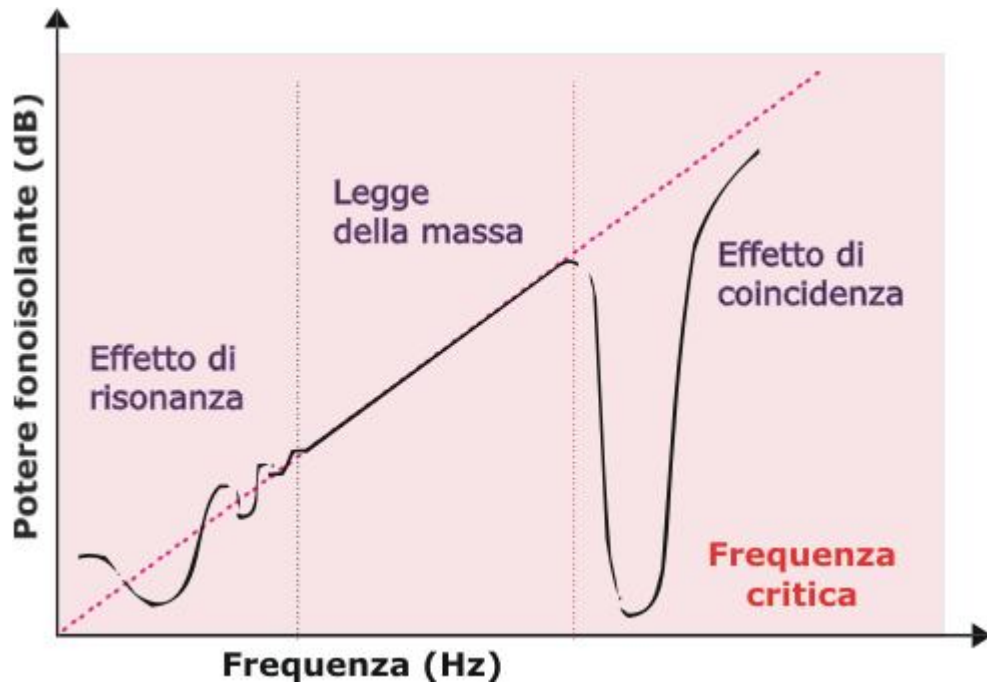


Figura 6 - Andamento del potere fonoisolante di un divisorio in funzione della frequenza

3.3.5. Risonanza strutturale

Nella prima regione di frequenze di interesse il comportamento del pannello dipende dalla sua rigidità, e potrebbe essere assimilato al comportamento di una molla. Questo significa che il pannello avrà delle frequenze, dette frequenze di risonanza, alle quali vibrerà secondo delle precise regole: ovviamente tali frequenze si modificheranno se il pannello viene vincolato ai bordi (come nel caso reale di un tramezzo fissato alle strutture laterali). Con riferimento alla relazione generale per piccoli valori di f ($K/\omega \gg 2\rho c$ e $\gg \omega m$) si verifica la seguente condizione:

$$R = 20 \log \frac{K}{2\rho c \omega}$$

Il potere fonoisolante dipende quindi solo dalla rigidità della parete e diminuisce all'aumentare della frequenza. Esiste un punto di minimo ad isolamento teorico nullo in corrispondenza della frequenza:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}}$$

Nei casi pratici più comuni f_0 è relativamente basso e il campo di R è regolato dalla rigidità ed assume un'importanza trascurabile. È invece assai più significativo l'ambito di R regolato dalla legge delle masse. Nel caso di una parete rettangolare vincolata ai suoi bordi la prima frequenza di risonanza del pannello è data dalla relazione:

$$f_{ris} = 0,45 c_l h \left[\left(\frac{N_x}{l_x} \right)^2 + \left(\frac{N_y}{l_y} \right)^2 \right] \quad [\text{Hz}]$$

dove:

c_l è la velocità di propagazione longitudinale del suono nel pannello;

h è lo spessore;

l_x è la larghezza del pannello;

l_y è l'altezza del pannello;

N_x e N_y sono numeri dei modi sui due assi.

Solitamente le frequenze di risonanza si presentano a frequenze piuttosto basse, al di sotto della gamma di frequenze di interesse per l'acustica edilizia (il calcolo di R_w parte dalla frequenza di 100 Hz).

3.3.6. Legge della massa

Il suddetto principio si può sintetizzare nella cosiddetta **legge della massa** la cui formula è:

$$R = 20 \log (mf) - 42,4$$

dove:

m è la massa per unità di superficie (kg/m^2)

f è la frequenza del suono incidente.

In definitiva il massimo risultato che si può ottenere in applicazione della legge della massa consiste in un incremento di isolamento acustico di 6 dB per ogni raddoppio della massa con valori incrementali proporzionali (es: 12 dB quadruplicando la massa). [10]

Per ottenere un isolamento acustico elevato senza ricorrere ad aumenti eccessivi del volume del divisorio si possono utilizzare divisori multipli (divisori doppi, tripli, etc.); in questi casi si potrebbe finanche ipotizzare un potere fonoisolante pari a quello della somma dei poteri fonoisolanti dei singoli divisori. Di fatto, però, le inevitabili connessioni strutturali tra i divisori comportano che il miglior risultato conseguibile (per un divisorio doppio) è un

aumento del potere fonoisolante di circa 10 dB rispetto ad un singolo divisorio di massa equivalente.

Tabella 1 – Potere fonoisolante di alcune strutture di uso comune in edilizia

Struttura	Spessore	Massa per unità di Superficie (Kg/m ²)	Potere Fonoisolante espresso in dB ad alcune frequenze (Hz)						
			63	125	250	500	1000	2000	4000
			Parete semplice in mattoni cavi	125	240	30	35	37	40
Parete semplice in mattoni pieni	360	720	35	45	44	50	57	65	70
Parete doppia in mattoni pieni (intercapedine d'aria di 56 mm)	300	380	28	34	35	40	55	72	77
Lastra di piombo	1,5	17	22	28	30	32	32	92	33
Lastra di piombo	3	34	25	30	30	28	38	44	33
Compensato su telaio di legno	6	3,5	6	9	12	15	20	26	28
Lastra di vetro semplice	6	15	16	10	24	28	31	26	35
Lastra di vetro semplice	16	40	20	25	27	32	30	38	45
Finestra con doppi vetri da 2,5 mm e 7 mm di intercapedine	12	15	15	22	15	20	28	30	26

3.3.7. Frequenza di Coincidenza

La propagazione delle onde sonore all'interno di una struttura solida avviene diversamente rispetto alla propagazione in aria: mentre il suono si propaga nell'aria solo per mezzo di onde longitudinali (onde che si propagano nella stessa direzione di oscillazione delle particelle d'aria), nei solidi il suono si propaga anche per mezzo di onde trasversali (onde la cui direzione di propagazione è perpendicolare alla direzione di oscillazione delle particelle del mezzo di propagazione). [9]

I fenomeni di coincidenza si manifestano per frequenze superiori ad una frequenza critica che dipende dalle caratteristiche del materiale costituente la parete ed è inversamente proporzionale al suo spessore. Conseguenza del fenomeno è una perdita di isolamento della parete, massima in corrispondenza della frequenza critica: questa perdita è tanto maggiore quanto minori sono le perdite interne; ad esempio sono materiali ad elevate perdite interne il piombo o la gomma, a perdite interne medie il legno ed il cemento, a basse perdite interno il vetro e l'acciaio.

3.3.8. Divisori multistrato

L'interesse prioritario rivolto alle strutture multistrato è dovuto al fatto che esse permettono di elevare notevolmente l'isolamento acustico contenendo l'aumento della massa, grandezza che risulta cruciale soprattutto nel caso di strutture per mezzi di

trasporto (si pensi agli aerei). In generale i divisori multistrato presentano alternanza di strati massivi (pannelli in lamiera, calcestruzzo, ecc.) e di strati fonoassorbenti (fibre di vetri, lane di roccia, strati porosi, ecc.), ossia aventi un elevato potere dissipativo. Inoltre il susseguirsi di impedenze acustiche molto diverse crea delle variazioni di fase per l'onda acustica che portano a fenomeni d'interferenza parzialmente distruttiva. Per non perdere l'attenuazione sonora che le strutture multistrato sono in grado di offrire, è necessario fare molta attenzione ai sistemi di fissaggio e connessione tra i vari elementi, in modo tale che eventuali "cortocircuiti acustici" siano minimizzati. [10]

Vista la vastità dei materiali utilizzati in acustica e la varietà delle possibili combinazioni degli strati, è impossibile dare a priori delle linee generali di comportamento delle strutture multistrato; l'unica indicazione che resta valida è il fatto che il potere fonoisolante tende ad essere crescente con la frequenza.

Per prevedere il comportamento acustico di divisori stratificati è dunque indispensabile ricorrere in fase progettuale alle tecniche di calcolo analitiche o numeriche, le quali permettono di ottenere la curva del potere fonoisolante della specifica struttura implementata nel modello.

3.3.9. Connessioni Strutturali

Nelle strutture impiegate per le più svariate applicazioni, dall'edilizia ai trasporti, i pannelli del singolo materiale vengono

montati sia per dare origine a divisori multistrato, sia per connettere vari elementi tra loro e costruire pareti di dimensioni maggiori. Inoltre le pareti finali sono montate su supporti che la connettono alla struttura globale (l'intero edificio, la nave, il treno, ecc.). Dunque nella pratica sono presenti moltissime tipologie di connessioni strutturali, dalle semplici viti alle saldature, dai giunti alle travi, dalle intelaiature alle canaline metalliche di supporto.

La presenza delle connessioni strutturali è di fondamentale importanza nell'analisi della prestazione acustica della struttura, in quanto esse rappresentano nella maggioranza dei casi dei percorsi acustici alternativi. Se questi percorsi non vengono controllati essi possono originare in opera dei veri e propri "disastri acustici" anche su strutture formate da elementi che offrono singolarmente elevate prestazioni. Infatti, vi sono molteplici fenomeni che possono inficiare il potere fonoisolante di un divisorio:

- Essendo i pannelli di dimensioni finite, la presenza di condizioni al contorno determina una distribuzione modale, che dipende inoltre dalla tipologia dei vincoli (ossia dal montaggio della parete costituita dall'assemblaggio dei vari pannelli);
- La presenza di percorsi sonori alternativi nelle intercapedini (giunti, montanti) può alterare sensibilmente la trasmissione delle stesse;

- Esistono problemi connessi alle perdite di propagazione per via solida (trasmissioni laterali);
- La distribuzione degli elementi di fissaggio (puntuali o per linea) incide sul potere fonoisolante;
- Il rapporto fra area e perimetro del singolo pannello può modificare il comportamento acustico;
- Sono presenti effetti di bordo della radiazioni.

3.3.10. Connessioni per punti o per Linea.

Si definisce *connessione a linea* una giunzione fra due pannelli che sia *continua*, come ad esempio una saldatura; la *connessione per punti* è, invece, una giunzione tra due pannelli che sia *non continua*, tipo una serie di viti distanziate con passo costante. [10]

Ad esempio, se due pannelli sono connessi da un giunto, l'energia delle onde flessurali viene in parte riflessa indietro e in parte trasmessa attraverso il giunto al pannello situato sulla faccia opposta della struttura, aumentando la trasmissione acustica della struttura stessa e quindi riducendone il potere fonoisolante. La differenza fra la presenza di una connessione a linea o per punti è molto spiccata, in quanto nei due casi è diversa la propagazione sulla superficie del pannello delle onde flessurali.

Per esse una connessione a linea si comporta come un bordo del pannello, ossia esse incontrano una forte resistenza all'attraversamento della giunzione fra le superfici 1e2 del

pannello superiore, quindi non vengono trasmesse all'area dall'altra parte della giunzione. Ciò fa sì che la maggior parte dell'energia trasmessa attraverso il giunto al pannello inferiore: il potere fonoisolante diminuisce.

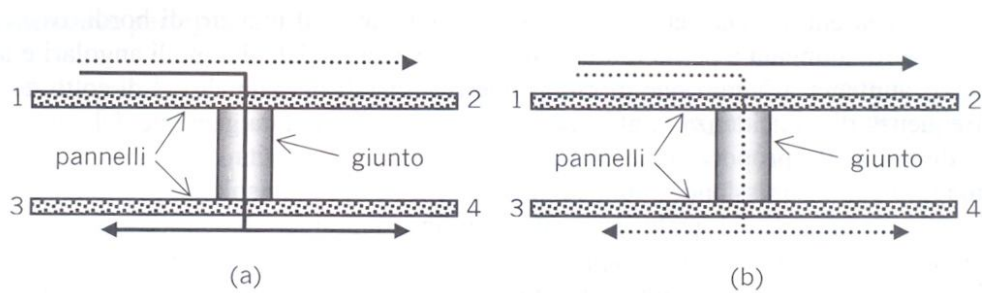


Figura 7 - esempi di connessione: (a) a linea; (b) per punti

In una connessione per punti il fenomeno è più complesso. Si immagina che la spaziatura delle viti abbia passo costante P . La propagazione sulla superficie del pannello delle onde flessurali aventi frequenza tale per cui la semilunghezza d'onda è inferiore al passo ($\lambda/2 < P$), incontra una debole resistenza sulla giunzione e quindi la maggior parte dell'energia attraversa la giunzione sulla superficie del pannello, senza venire trasmessa dalla parte opposta della struttura: il potere fonoisolante resta elevato. [10]

Esiste una frequenza limite, detta "frequenza di trasferimento" f_{tp} a cui le onde flessurali hanno semilunghezza d'onda uguale al passo ($\lambda/2 = P$). Per frequenze inferiori le onde flessurali hanno semilunghezza maggiore del passo ($\lambda/2 > P$): la propagazione superficiale è praticamente impedita e la giunzione si comporta

come una connessione a linea, dando origine ad una caduta del potere fonoisolante.

Vi sono inoltre altri due aspetti da tenere presenti. Se si considera un pannello al quale sia connessa una trave di supporto, la tipologia della connessione cambia la rigidità alla flessione del pannello sulla direzione della giunzione, che sarà maggiore per connessioni a linea e tanto minore quanto più è ampio il passo della connessione per punti. Ma variazioni di rigidità si ripercuotono sul valore della frequenza di coincidenza, spostandola a frequenze differenti. Inoltre la perdita di *isotropia* sulle due direzioni superficiali del pannello è causa della comparsi di due differenti frequenze di coincidenza, delle quali la prima era quella originaria e la seconda quella abbassata dall'aumento di rigidità in una sola direzione. Si ha una modifica dell'intero andamento del potere fonoisolante.

Il secondo aspetto da tenere presente è che, se l'onda superficiale interpreta la connessione come una linea (ossia come un bordo), per essa il pannello è suddiviso in due pannelli separati: quindi diminuisce il rapporto fra area e perimetro (il quale è aumentato).

3.3.11. Problemi di rapporto area-perimetro

A frequenza inferiore della frequenza di coincidenza f_c di un divisorio, l'andamento del potere fonoisolante si scosta dalla legge della massa, dovuta alla progressiva eccitazione dei modi di bordo, sia angolare che laterali. [10]

Senza entrare nei dettagli, risulta intuitivo che se il numero di bordi, ossia il perimetro, aumenta a parità di area, anche la densità modale dei modi angolari e laterali aumenta. L'equazione di radiazione del pannello al di sotto della frequenza di coincidenza f_c , afferma che la radiazione sonora è direttamente proporzionale al perimetro. Dunque a parità di d'area, a perimetro maggiore la trasmissione sonora è maggiore e il potere fonoisolante è minore. In un pannello al quale sia connessa a linea una trave di supporto, la connessione per onde flessurali rappresenta un bordo, dunque aumenta il numero di bordi del pannello, ossia aumenta il perimetro totale del pannello. Un aumento del 50% sulla lunghezza perimetrale può causare un aumento della trasmissione sonora di circa 2 dB nelle bande di frequenza precedenti la frequenza f_c .

3.3.12. Problemi di angoli retti.

La maggior parte dei divisori e delle finestre presenta un montaggio in opera ad angoli retti, sia per motivi di design, sia per la connessione con altre strutture. Questi angoli retti possono

umentare la trasmissione sonora di circa 3 dB a frequenze inferiori alla frequenza f_c , in quanto causano una forte interazione fra le onde flessurali che si propagano sulla struttura e l'area circostante l'angolo. Ciò aumenta la possibilità di radiazione di suono all'angolo e la conseguente riduzione del potere fonoisolante della struttura. [10]

La riduzione della radiazione del suono agli angoli retti può essere ottenuta facilmente utilizzando piccoli cunei che modificano l'angolo di attacco dell'onda e l'energia dissipata.

3.3.13. Consigli utili per il progettista

Le considerazioni che seguono possono essere sfruttate a vantaggio del progettista avendo chiaro l'obbiettivo acustico che il pannello deve perseguire:

- 1) Frequenza di risonanza fondamentale f_0 ; la relazione:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$$

indica che per modificare il valore della frequenza f_0 è possibile agire sulle proprietà inerziali o quelle elastiche; un aumento della massa M del pannello causa uno spostamento di f_0 verso le basse frequenze, mentre un aumento della rigidità K ottiene l'effetto contrario;

- 2) Frequenza di coincidenza f_c ; è data, in tutta generalità, dalla relazione:

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi \sqrt{\frac{B}{\rho S(1-v^2)}}}$$

nel caso di una piastra di spessore d , il momento d'inerzia della sezione S rispetto ad un asse per il centro di massa è

$$I = \frac{Sd^2}{12}, \text{ fornisce:}$$

$$f_c = \frac{c^2}{1,81 d \sqrt{\frac{E}{\rho(1-v^2)}}}$$

Questa relazione mostra come la frequenza di coincidenza di un pannello sottile sia inversamente proporzionale allo spessore; in oltre si può osservare che il prodotto $f_c d$ è una costante, dipendente unicamente da parametri propri del singolo materiale (modulo di Young E , densità ρ , rapporto di Poisson ν). Di seguito riportiamo una tabella riportante i valori tipici del prodotto $f_c d$ (a 20°C) per alcuni materiali di impiego comune.

Tabella 2 - Valori tipici del prodotto f_{cd} a 20 °C

Materiale	Acciaio	Alluminio	Ottone	Rame	Vetro	Compensato
$f_c d$ (m/s)	12,4	12	17,8	16,3	12,7	≈20

3.4. Fono assorbimento: principi generali

I materiali e gli elementi assorbenti sono largamente utilizzati nel trattamento acustico degli ambienti, soprattutto del soffitto, quando si desidera ridurre l'energia sonora riverberata. Il loro uso consente il controllo del tempo di riverberazione, a distanze opportune dalla sorgente sonora, del livello di pressione sonora totale presente nell'ambiente.

Più in generale, l'assorbimento dell'energia sonora emessa è uno dei metodi di riduzione del rumore più efficaci quando la propagazione del suono avviene all'interno di spazi chiusi, come ad esempio nei condotti o quando si intenda isolare una sorgente rispetto all'ambiente circostante con una cabina insonorizzata. I materiali assorbenti sono inoltre applicati sulle barriere acustiche per diminuire la riflessione del suono dalla loro superficie. [10]

3.4.1. Proprietà fondamentali

Le proprietà assorbenti dei materiali vengono quantificate attraverso il coefficiente di assorbimento acustico α , definito come rapporto tra l'energia sonora assorbita e l'energia incidente. Il valore numerico del coefficiente di assorbimento rappresenta quindi la frazione di energia sonora che viene assorbita da un materiale e può variare fra zero, nel caso in cui tutta l'energia sia riflessa, e uno, nel caso in cui tutta l'energia sia

assorbita. Ad esempio, un coefficiente di assorbimento di 0,65 indica che il 65% dell'energia sonora che incide sul materiale viene assorbita.

Il coefficiente di assorbimento varia al variare della frequenza e dell'angolo di incidenza dell'onda acustica. In laboratorio vengono misurati il coefficiente di assorbimento ad incidenza normale, con il metodo delle onde stazionarie in tubo, su campioni di piccole dimensioni, e il coefficiente di assorbimento per incidenza casuale, in camera riverberante, su campioni di grandi dimensioni. Poiché nelle condizioni reali le onde sonore incidono secondo diversi angoli, il coefficiente di assorbimento ad incidenza casuale è quello che meglio si avvicina alle reali condizioni d'impiego. Il metodo di misura in camera riverberante può essere applicato anche a strutture o elementi assorbenti. Valori sperimentali di coefficiente di assorbimento superiori ad 1, talvolta misurati in camera riverberante, indicano che sono stati ricavati in condizioni di campo sonoro non sufficientemente diffuso. [10]

Il principio fisico alla base dell'assorbimento acustico è la conversione di parte dell'energia sonora incidente in calore; tuttavia questo avviene con modalità diverse, in relazione alla tipologia ed alla struttura dell'elemento assorbente. È possibile identificare tre meccanismi fondamentali di assorbimento:

- per porosità

- per risonanza di membrana
- per risonanza di cavità.

Ad essi corrispondono diversi andamenti della curva rappresentante il coefficiente di assorbimento in funzione della frequenza.

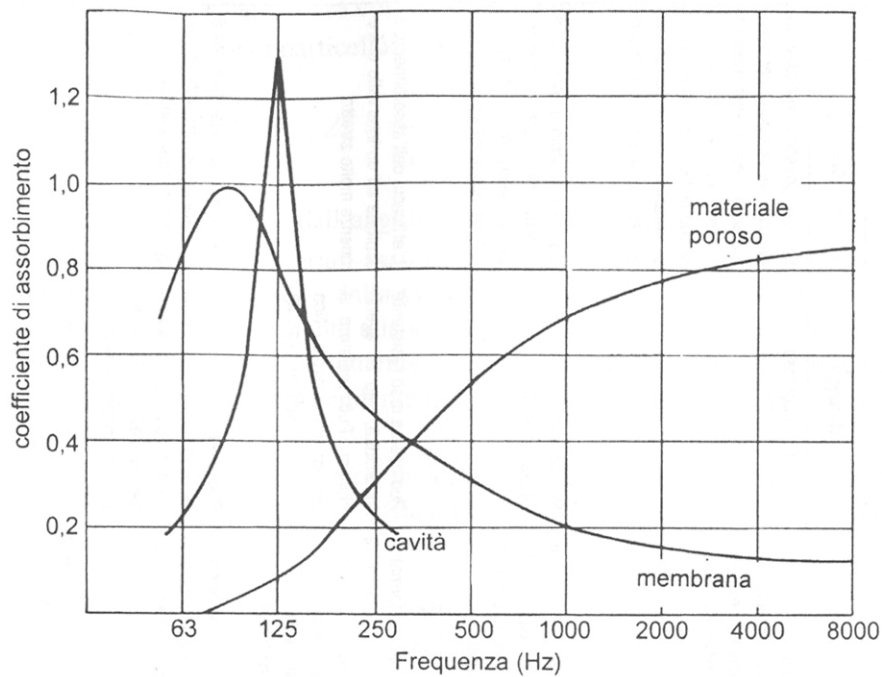


Figura 8 – Assorbimento acustico di diversi tipi di elementi assorbenti

3.4.2. Assorbimento per porosità

I materiali porosi acusticamente assorbenti sono di vario tipo, lane di vetro e di roccia, schiume di poliuretano espanso celle aperte, fibre di legno, feltri. Essi sono caratterizzati da una struttura a pori aperti, anche sulla superficie esterna, e comunicanti tra loro, con dimensione tipiche dei pori inferiori a 1 mm, molto minori delle lunghezze d'onda acustiche d'interesse. Quando un onda

acustica penetra in un materiale poroso, le molecole d'aria, costrette a vibrare all'interno dei pori e dei canali di collegamento, perdono energia a causa dell'attrito contro le superfici esterne delle fibre o delle particelle che formano la struttura del materiale. Considerando le dimensioni fisiche dei pori, il materiale si comporta rispetto alla propagazione del suono come un mezzo omogeneo in cui si verificano perdite viscosive.

Mediando i valori del coefficiente di assorbimento su tutti i possibili angoli di incidenza, si ottiene il coefficiente di assorbimento statistico, o per incidenza casuale. La maggior parte dei valori dei coefficienti di assorbimento reperibili in letteratura sono relativi a misure effettuate in camera riverberante confrontando i tempi di riverberazione a camera vuota e in presenza del materiale assorbente. Tali valori superano i corrispondenti veri coefficienti statistici talvolta anche del 50% a basse frequenze (fino a 500 Hz) e del 20% ad alte frequenze (4KHz). Il coefficiente di assorbimento misurato in camera riverberante è solitamente indicato come *coefficiente di assorbimento di Sabine*. Le differenze tra il vero coefficiente di assorbimento ad incidenza casuale e quello misurato in camera riverberante sono dovute a diversi fattori, tra cui il più importante è una certa diminuzione di diffusività del campo sonoro in presenza del materiale assorbente.

La porosità h_p è definita come rapporto tra il volume occupato dai pori e il volume totale. I materiali che assorbono il suono con

efficacia hanno porosità tra il 90 e il 95%. L'assorbimento cresce aumentando la porosità.

Il *fattore di struttura* χ esprime l'influenza della forma geometrica della struttura del materiale sulla propagazione dell'onda sonora, infatti il fluido all'interno dei pori subisce un apparente aumento della densità e diminuzione della velocità di vibrazione in relazione ad accelerazioni positive o negative dovute alla forma dei pori. Il fattore di struttura è quindi determinato soprattutto dai pori e dalle cavità che sono perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda. Il fattore di struttura diminuisce all'aumentare della frequenza, e generalmente assume valori compresi tra 3 e 1. [10]

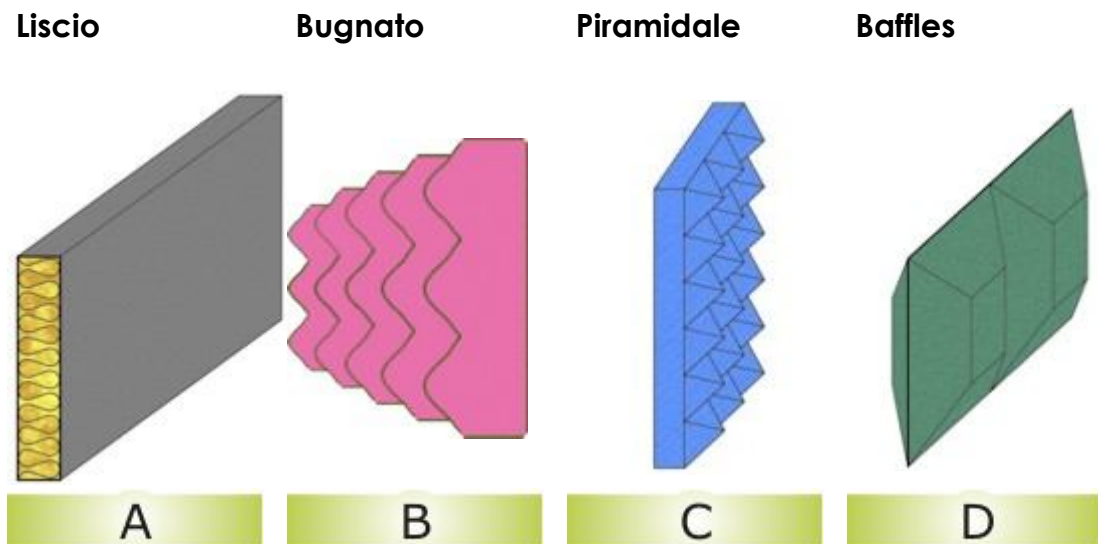


Figura 9 – Materiali assorbenti con diverse superfici a contatto con l'onda sonora

3.4.3. Effetti dello spessore del materiale assorbente

È logico aspettarsi un maggiore assorbimento sonoro da materiali più spessi, ma ciò vale in pratica solo alle basse frequenze. [8]

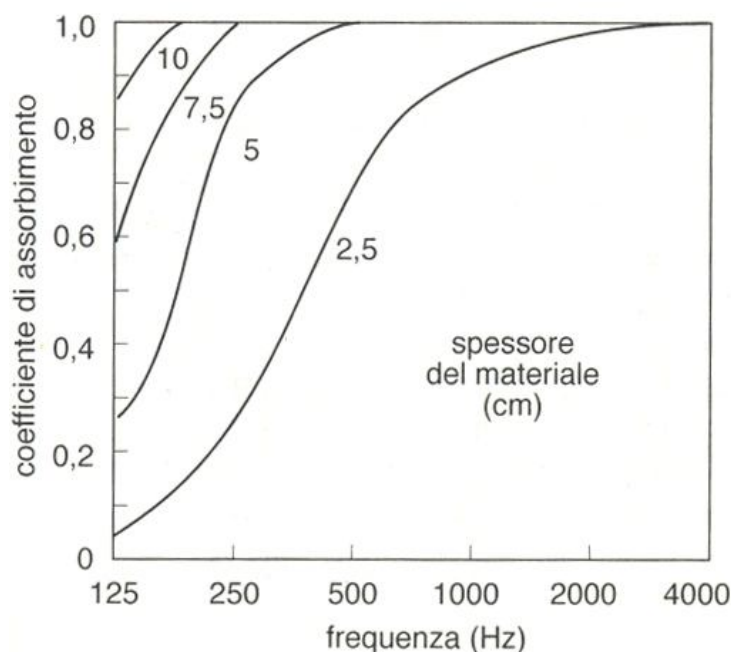


Figura 10 – Lo spessore del materiale fonoassorbente in fibra di vetro (densità di 50 Kg/m³) determina l'assorbimento a bassa frequenza. Il materiale è montato direttamente su una superficie rigida.

La figura mostra gli effetti di uno spessore variabile, con il materiale assorbente a contatto diretto con una superficie solida. Al di sopra dei 500 Hz, l'aumento di spessore da 5 a 10 cm non introduce molta differenza, mentre al di sotto dei 500 Hz l'aumento di spessore dà invece un miglioramento sensibile. Anche il guadagno dell'assorbimento complessivo è proporzionalmente maggiore passando da 2,5 a 5 rispetto a quanto avviene passando da 5 a 7,5 o da 7,5 a 10 cm. Il materiale in fibra di vetro dello spessore di 10 cm e con una

densità di 50 kg/m³ ha un assorbimento praticamente perfetto nella regione compresa fra 125 Hz e 4 KHz.

3.4.4. Effetto della distanza del materiale assorbente dalla parete

L'assorbimento alle basse frequenze può essere aumentato tenendo il materiale assorbente distanziato dalla parete. In questo modo si possono migliorare le prestazioni, per lo meno in parte, senza aggravio di spesa. [8]

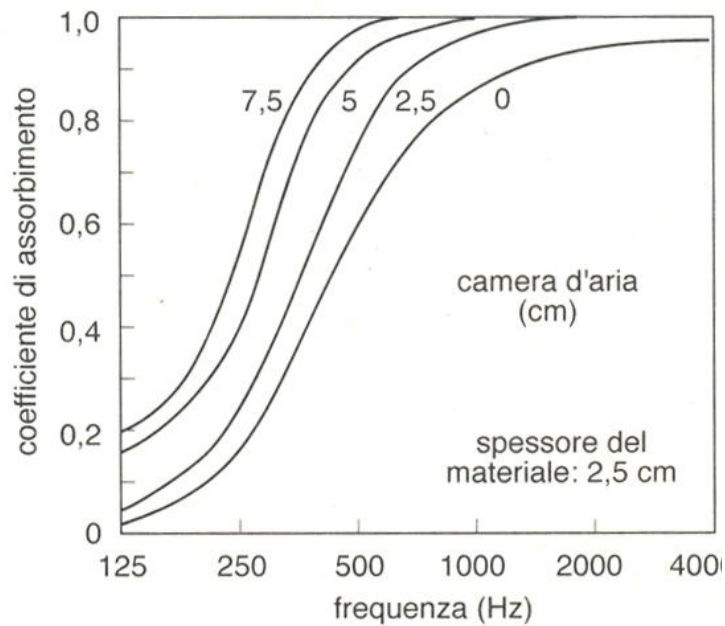


Figura 11 – si può migliorare l'assorbimento a bassa frequenza di un pannello in fibra di vetro da un pollice, distanziandolo adeguatamente dalla parete.

La figura mostra la variazione del coefficiente di assorbimento in base alla distanza dalla parete del pannello in fibra di vetro da 2,5 cm. Una spaziatura di 7,5 cm con materiale da 2,5 cm ha un effetto di assorbimento che si avvicina a quello di un pannello dello stesso materiale, ma con spessore doppio, montato direttamente sulla parete.

3.4.5. Effetti della densità dell'assorbitore

La fibra di vetro ed altri materiali sono disponibili in densità diverse, che vanno da quelle dei listelli sottili per l'isolamento termico a quelle dei pannelli semirigidi e rigidi, usati ampiamente a livello industriale. Tutti questi materiali possono trovare un impiego anche nel trattamento acustico degli ambienti, ma ci si domanda che effetto ha la densità, ovvero la compattezza delle fibre, sul coefficiente di assorbimento sonoro. In altre parole, si vuole sapere se il suono è in grado di penetrare negli interstizi della superficie del materiale più duro e a densità maggiore, così come avviene per i materiali meno consistenti. [8]

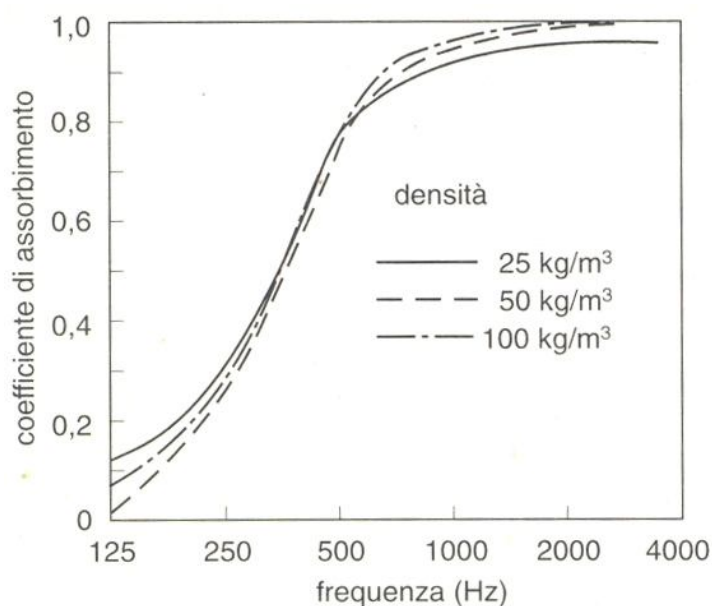


Figura 12 – la densità del materiale assorbente in fibra di vetro ha un effetto minimo sull'assorbimento nella gamma compresa fra 25 e 100 Kg/m³. Il materiale è montato direttamente su una parete solida.

La risposta è data dalla figura che mostra una differenza minima di coefficiente di assorbimento quando si passa da una densità a un'altra quattro volte più grande. Per densità molto basse le fibre

sono così distanziate che l'assorbimento ne risente negativamente nel caso di pannelli particolarmente compatti, la riflessione in superficie è alta e di conseguenza la penetrazione sonora è bassa.

3.4.6. Assorbimento per risonanza di cavità

In acustica edilizia gli assorbitori per risonanza più frequentemente utilizzati sono quelli di Helmholtz, costituiti da un volume d'aria contenuto in una cavità con pareti rigide, collegata all'ambiente esterno attraverso un'apertura relativamente stretta, detta "collo" del risonatore. [8]

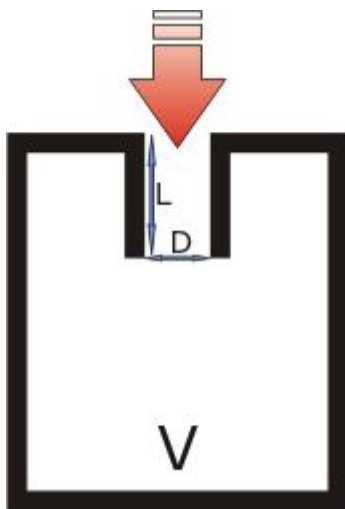


Figura 13 – Risonatore di Helmholtz

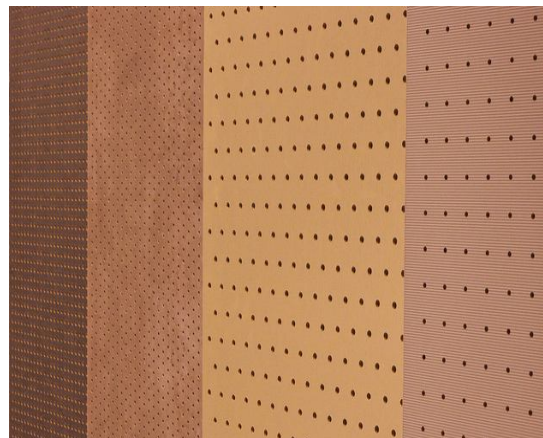


Figura 14 – Pannelli forati che sfruttano il principio del risonatore di Helmholtz

Quando un'onda sonora incide sul collo del risonatore, l'aria che si trova all'interno del collo viene messa in vibrazione e di conseguenza l'aria all'interno della cavità subisce compressioni e rarefazioni periodiche. In analogia ai sistemi meccanici si può dire l'aria all'interno del collo si comporta come una "massa vibrante", mentre l'aria contenuta nella cavità si comporta come una "molla acustica".

La frequenza di risonanza è direttamente proporzionale alla sezione del collo e inversamente proporzionale alla sua lunghezza ed al volume della cavità. L'assorbimento di questo tipo è molto selettivo intorno alla frequenza di risonanza e quindi particolarmente efficace nel caso di toni puri di bassa frequenza, come ad esempio modi propri di vibrazioni di ambienti, tipicamente nell'intervallo di frequenza tra 50 e 400Hz. Il principio dei risonatori di Helmholtz è stato utilizzato (più o meno consapevolmente, negli antichi teatri all'aperto, impiegando dei grossi vasi) e nel medioevo in alcune chiese di Svezia e Danimarca (a volte le cavità venivano riempite con della cenere. Se all'interno del risonatore è rivestito con materiale assorbente poroso, a causa degli effetti dissipativi che si instaurano nella cavità, il valore di coefficiente di assorbimento alla frequenza di risonanza diminuisce, ma si allarga l'intervallo di frequenze in cui l'assorbimento è efficace. [8]

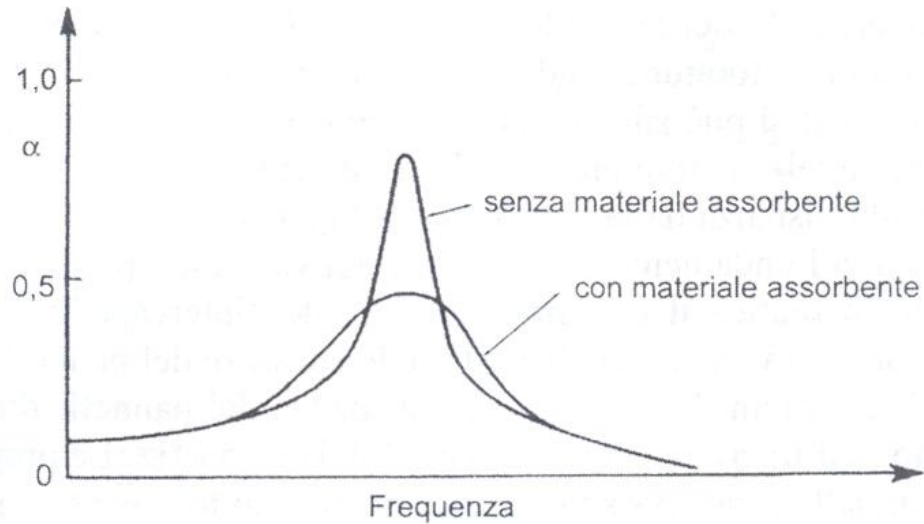


Figura 15 – Andamento tipico del coefficiente di assorbimento associato ad un risonatore di Helmholtz nudo o rivestito di materiale assorbente.

3.4.7. Assorbimento per risonanza di membrana

Il comportamento di un sistema costituito da un pannello sottile, collocato di fronte ad una parete rigida, ad una distanza non troppo elevata può essere analizzato con lo stesso principio usato per il risonatore di Helmholtz. Il pannello si comporta come una massa vibrante, mentre l'aria contenuta nelle cavità come una molla acustica, caratterizzata dalla sua rigidità. [10]

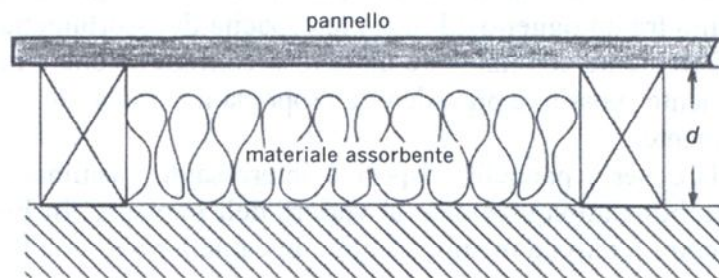


Figura 16 - pannello sottile di massa m per unità di area, disposto ad una distanza d da una superficie rigida, con materiale assorbente nell'intercapedine

Si può dimostrare che la frequenza di risonanza di una struttura di questo tipo è:

$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{md}} \text{ [Hz]}$$

dove:

m massa per unità di area del pannello [Kg/m^2]

d distanza dalla parete [m]

Ad esempio un pannello di compensato di spessore 5 mm, con densità di $800Kg/m^3$, installato ad una distanza dalla parete di 20 cm, avrà una frequenza di risonanza di circa 67Hz. Dalla relazione si può osservare che la frequenza di assorbimento massimo diminuisca all'aumentare della massa specifica e della profondità dell'intercapedine d'aria tra pannello e parete. Come per i risonatori di Helmholtz, l'assorbimento di pannelli risonanti è molto selettivo intorno alla frequenza di risonanza, tuttavia anche in questo caso si può estendere l'efficacia *inserendo materiale poroso nell'intercapedine*. [10]

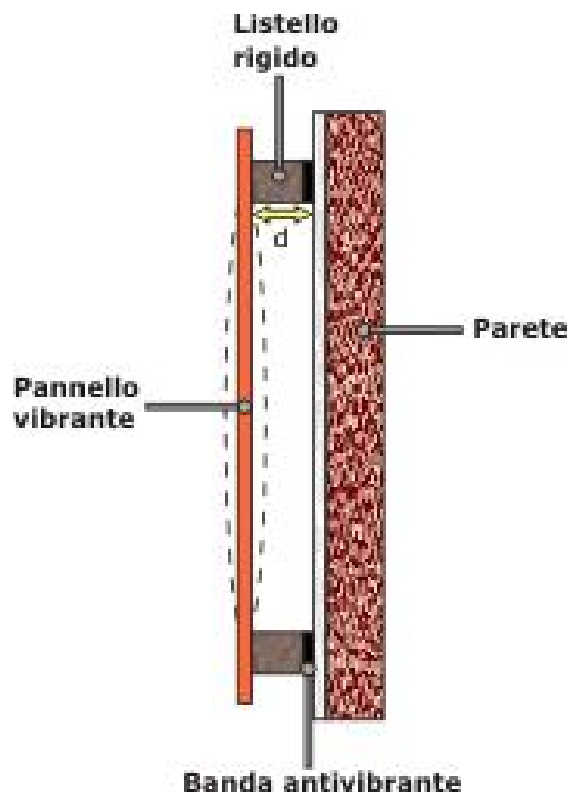


Figura 17 – Sistema fonoassorbente semplice

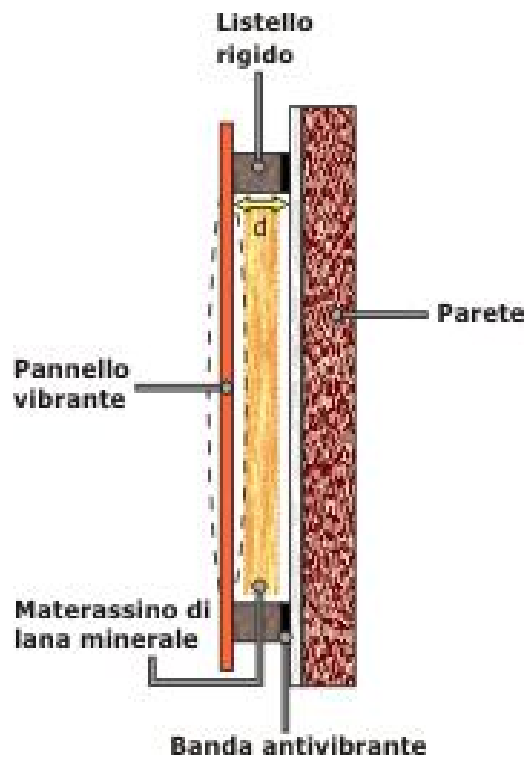


Figura 18 – Sistema fonoassorbente con materiale poroso

3.4.8. Materiali fonoassorbenti

Tabella 3 – Proprietà e principali applicazioni di alcuni tipi di materiali e strutture assorbenti

Tipo di materiale	Mecanismo di assorbimento	Caratteristiche di assorbimento	Applicazioni	Vantaggi	Svantaggi
Materiale poroso (lana fibrosa (lana di roccia, fibra di vetro)	Perdite viscoso dovute alla diversa velocità delle particelle d'aria adiacenti alla fibra rispetto a quelle al centro dello spazio tra due fibre	Elevato alle frequenze medie ed alte. Alle basse frequenze è necessario un notevole spessore di materiale	Silenziatori nei condotti per l'aria, aumento dell'assorbimento negli ambienti riverberanti	Poco costoso	Le fibre possono costituire un pericolo per la salute, per cui il materiale deve essere rivestito in modo adeguato. Il materiale si può polverizzare in presenza di vibrazioni. Non è resistente all'olio, acqua agenti chimici
Plastiche e gomme porose (schiuma di poliuretano)	Perdite viscoso dovute alla diversa velocità delle particelle d'aria adiacenti alle pareti dei canali interni rispetto a quelle al centro del canale	Elevato a medie ed alte frequenze. A basse frequenze è necessario un notevole spessore di materiale	Cabine di autoveicoli, aumento dell'assorbimento negli ambienti riverberanti	Nessun rischio per la salute causato dalle fibre	Costoso. Rischio di incendio e di fumo. Non sopporta temperature elevate. Non è resistente all'olio, acqua ed agenti chimici
Risonatori di Helmholtz	Perdite viscoso in prossimità del collo del risonatore	Elevato ma molto selettivo intorno alla frequenza di risonanza	Cabine per trasformatori elettrici, silenziatori di autoveicoli, silenziatori per rumore a toni puri ad esempio generato da grandi ventilatori	Può essere reso resistente all'umidità, olio ed agenti chimici. Può resistere a temperature elevate. Non comporta rischi per la salute	L'efficacia dell'assorbimento è limitata ad un intervallo di frequenze molto stretto
Pannelli risonanti	Perdite dovute allo smorzamento causato dal pannello e dalla cavità retrostante	Elevato ma piuttosto selettivo intorno alla frequenza di risonanza	Cabine per trasformatori elettrici, auditori, sale da concerto, ambienti riverberanti	Può essere reso resistente all'umidità, olio ed agenti chimici. Può resistere a temperature elevate. Non comporta rischi per la salute	L'efficacia dell'assorbimento è limitata ad un intervallo di frequenze piuttosto limitato

3.4.9. Incremento del potere fonoisolante

Se un divisorio in muratura (verticale o orizzontale) viene applicato uno strato addizionale per il tramite di un supporto elastico, si determina un sistema risonante a doppia parete che può produrre un miglioramento del potere fonoisolante complessivo. [10]

Questo intervento viene spesso effettuato per migliorare le prestazioni di divisori esistenti, ma può anche essere attuato in nuove costruzioni. Condizione essenziale per la sua efficacia è che il collegamento tra le due strutture avvenga con il minor numero di punti rigidi.

Per i divisori verticale sono molto utilizzate le contropareti formate da una lastra di gesso rivestito, accoppiata con un pannello di fibra minerale. L'applicazione avviene di norma per incollaggio.

Nelle strutture orizzontali (solai) lo strato addizionale può essere rappresentato dalla controsoffittatura, considerata come trattamento sulla superficie inferiore, oppure al pavimento galleggiante (massetto e pavimentazione su supporto elastico), considerato come trattamento sulla superficie superiore. L'entità del miglioramento prodotto dipende:

- dal potere fonoisolante della struttura esistente;
- dalla frequenza propria f_0 del sistema risonante formato dalle due strutture e dall'intercapedine che le separa;
- dalle caratteristiche del supporto elastico.

Per il pavimento galleggiante la frequenza di risonanza è data da:

$$f_0 = 160 \sqrt{S' \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \text{ [Hz]}$$

dove:

m'_1 è la massa areica del solaio [Kg/m^2]

m'_2 è la massa areica del pavimento galleggiante [Kg/m^2]

S' è la rigidità dinamica per unità di superficie del supporto elastico [MN/m^3]

per le contropareti e le controsoffittature, non essendovi carico statico sul rapporto elastico, viene considerata la rigidità dinamica S'_a dell'aria contenuta nel materiale elastico. Nel caso di materiali porosi o fibrosi, assumendo l'ipotesi che la propagazione sonora al loro interno sia isotermica, si ha:

$$S'_a = \frac{P_0}{dh_p} \text{ [MN/m}^3\text{]}$$

dove:

P_0 è la pressione atmosferica [Pa]

h_p è la porosità del materiale [%]

d è lo spessore del materiale [m]

Con i materiali porosi normalmente utilizzati per queste applicazioni, attribuendo una densità di 50 Kg/m^3 , una porosità pari o superiore

al 95% e una resistività al flusso superiore a $5 \text{ KPa} \cdot \text{s}/\text{m}^2$, per una pressione atmosferica di 10^5 Pa , si ha approssimativamente:

$$S'_a = \frac{0,1}{d} \quad [\text{MN}/\text{m}^3]$$

quindi la frequenza f_0 risulta data da:

$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{0,1}{d} \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} = 50 \sqrt{\frac{1}{d} \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \quad [\text{Hz}]$$

Conoscendo il valore di f_0 , il miglioramento del potere fonoisolante globale ΔR_w può essere calcolato con la seguente formula empirica:

$$\Delta R_w = 72 - \left(\frac{R_{w,m'_1}}{2} + 20 \log f_0 \right) \quad [\text{dB}]$$

dove:

R_{w,m'_1} è il potere fonoisolante della struttura esistente, avente massa m'_1 .

I limiti di applicabilità sono riconducibili a valori di f_0 compresi fra 40 e 200 Hz e a valori di R_{w,m'_1} compresi fra 20 e 50 dB.

Occorre tener presente che con i valori della frequenza di risonanza superiori a 200 Hz, possono risultare, almeno in determinate situazioni, valori negativi di ΔR_w : l'applicazione di uno strato aggiuntivo potrebbe quindi addirittura produrre un peggioramento delle prestazioni acustiche.

Dall'equazione risulta che il valore di ΔR_w è inversamente proporzionale al potere fonoisolante R_{w,m'_1} della parete originaria e anche inversamente proporzionale alla frequenza di risonanza massa-aria-massa f_0 . Risulta inoltre che la stessa frequenza di risonanza è inversamente proporzionale alle masse areiche delle due strutture componenti e allo spessore dell'intercapedine che le separa.

Nella realtà, per quanto riguarda le pareti, il caso più frequente è rappresentato da una parete esistente (generalmente in muratura) la cui massa areica è molto più elevata di quella della seconda parete che è generalmente costituita da una lastra di gesso rivestito di spessore compreso fra 9 e 13 mm; sono reperibili in commercio le cosiddette "contropareti", in cui la lastra di gesso è già accoppiata per incollaggio ad un pannello in fibre minerali, il cui spessore varia tra 30 e 80 mm.

È facile verificare con il calcolo che il valore di f_0 è determinato, in queste situazioni, essenzialmente dallo spessore dell'intercapedine (che corrisponde allo spessore del pannello fibroso), mentre concorre in misura molto marginale la massa areica della parete originaria.

Considerando un campo compreso fra 100 e 600 kg/m^2 , che copre praticamente tutte le possibili varietà di pareti in muratura, e attribuendo alla seconda parete un valore costante di 12 kg/m^2

(massa della lastra di gesso), a parità di intercapedine le vibrazioni estreme della frequenza di risonanza sono non superiori al 5%. Il termine $20 \log f_0$ tra i valori estremi di frequenza varia quindi di una quantità trascurabile, non superiore a 0,5 dB.

Nello stesso campo di massa areica, per spessori di intercapedine di compresi fra 3 e 8 cm, il termine $20 \log f_0$ varia in misura più sensibile, di circa 4 dB.

La maggiore influenza sul valore di ΔR_w è comunque esercitata dal valore del potere fonoisolante della parete originaria (non necessariamente legato alla sola massa areica). Ipotizzando valori di R_{w,m'_1} entro i limiti di applicabilità dell'equazione prima indicati (tra 20 e 50 dB), a parità di tutto il resto, si ha una variazione di ΔR_w di 6 dB.

Risulta quindi, in definitiva, che il miglioramento del potere fonoisolante di una parete sarà tanto più elevato quanto più basso è il valore di partenza, relativo alla parete originaria.

Metodo semplificato

In alternativa al metodo sopracitato, dopo aver calcolato la frequenza di risonanza f_0 , l'incremento dell'indice di valutazione del potere fonoisolante, ΔR_w , si può ricavare dalla seguente tabella, valida per strutture di base aventi l'indice di valutazione del potere fonoisolante, R_w , compreso da 20 dB a 60 dB.

Tabella 4 – tabella di riferimento per il calcolo dell'incremento del potere fonoisolante ΔR_w

Frequenza di risonanza f_0 [Hz]	ΔR_w [dB]
$f_0 < 80$	35-Rw/2
$80 < f_0 < 125$	32-Rw/2
$125 < f_0 < 200$	28-Rw/2
$200 < f_0 < 250$	-2
$250 < f_0 < 315$	-4
$315 < f_0 < 400$	-6
$400 < f_0 < 500$	-8
$500 < f_0 < 1600$	-10
$f_0 > 1600$	-5

4. Stato dell'arte e quadro di riferimento per l'acustica

4.1. Premessa sul quadro normativo di riferimento

A fronte della sempre crescente attenzione alle problematiche ambientali e alla coscienza di dover affrontare e risolvere i problemi relativi ad uno sviluppo realmente sostenibile, anche l'edilizia inizia a considerare nuovi percorsi.

Da tempo, si parla di "sviluppo sostenibile" ed "eco compatibile": disciplina progettuale che, attraverso studi svolti da medici, architetti, ingegneri, geologi, ecc., cerca di dare una risposta all'origine di alcuni problemi che insidiano la salute dell'uomo e la salvaguardia dell'ambiente.

Promuovere un'edilizia sostenibile, in sintesi, vuol dire pensare anche soluzioni costruttive compatibili con la soddisfazione dell'utenza, la salvaguardia dell'ambiente e la creatività del progettista.

Il "rumore" era, sino a poco tempo fa, una delle fonti di inquinamento più sottovalutate e meno controllate e solo da poco è stato riconosciuto come grave minaccia per la salute e per il benessere psico – fisico dell'uomo; presa di coscienza che ha portato ad elaborare leggi che regolamentano i livelli ammissibili di inquinamento da rumore.

L'inquinamento da rumore e l'interferenza che si materializza in termini di disturbo da rumore, sono parametri determinati nella definizione della qualità ambientale; un'unità abitativa o un ufficio inseriti in un ambiente rumoroso sono meno appetibili e quindi il rumore incide sulla quotazione degli immobili.

Non sempre però è facile valutare la rumorosità caratteristica e potenziale di un'unità immobiliare per la quale si potrebbe avere interesse. Non basta, infatti, controllare se l'immobile ha doppi vetri per avere la certezza di abitare un ambiente silenzioso.

Occorre approfondire ogni aspetto, verificando:

- l'isolamento acustico delle facciate, intese come insieme di elementi di tamponamento ed elementi finestrati complessi;
- l'isolamento acustico dei divisori verticali ed orizzontali, migliorabile attraverso applicazione o inserzione di materiali ad elevata resa acustica o soluzioni tecniche di equivalente valenza;
- l'isolamento al calpestio delle solette, adeguabile attraverso pavimenti galleggianti o soluzioni analoghe;
- il basso livello di emissione degli impianti sanitari, contenibile

attraverso la posa svincolata dei componenti o la scelta di soluzioni a basso rumore intrinseco;

- il rumore degli impianti di servizio quali ascensore, riscaldamento, autoclavi, ecc..

E' in fase di progetto che prende forma e si rende possibile la vera protezione contro i rumori esterni ed interni dell'edificio.

Sono state pubblicate tre parti della norma UNI EN 12354 "Acustica in edilizia – Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti" e precisamente:

- Parte 1: Isolamento dal rumore per via aerea tra ambienti;
- Parte 2: Isolamento acustico al calpestio tra ambienti;
- Parte 3: Isolamento acustico contro il rumore proveniente dall'esterno per via aerea.

La Parte 1 descrive modelli di calcolo per valutare l'isolamento dal rumore trasmesso per via aerea tra i diversi ambienti di un edificio, utilizzando principalmente i dati misurati che caratterizzano la trasmissione laterale diretta o indiretta da parte degli elementi di edificio e i metodi di derivazione teorica riguardanti la propagazione sonora negli elementi strutturali.

La Parte 2 definisce, in particolare, i modelli di calcolo per l'isolamento acustico al calpestio tra ambienti sovrapposti.

La Parte 3 definisce invece un modello di calcolo per l'isolamento acustico o la differenza di livello di pressione sonora di una facciata o di una diversa superficie esterna di un edificio.

Il calcolo è basato sul potere fonoisolante dei diversi elementi che costituiscono la facciata e considera la trasmissione diretta e laterale. Il calcolo fornisce dei risultati che approssimativamente dovrebbero corrispondere ai risultati ottenuti con misurazioni in opera, secondo la UNI EN ISO 140 – 5.

I risultati del calcolo possono essere altresì utilizzati per determinare il livello di pressione sonora immesso in ambiente interno dovuto, per esempio, al rumore del traffico stradale.

L'inquinamento da rumore e l'interferenza che si materializza in termini di disturbo da rumore, sono parametri determinanti nella definizione della qualità di un ambiente. Non sempre però è facile valutare la rumorosità caratteristica e potenziale di una unità immobiliare per la quale si potrebbe avere interesse:

1) nella Legge n. 447 "Legge quadro sull'inquinamento acustico", all'art. 8 il legislatore fa intravedere la volontà di attivare questa iniziativa di attività preventiva, introducendo la valutazione del clima acustico oltre la previsione e valutazione dell'impatto acustico con riferimento ad un gran numero di tipologie di attività ed anche in riferimento ai requisiti degli edifici;

2) nel DPCM 05 – 12 – 97 "Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici", si focalizza l'importanza dell'intervento tecnico in fase progettuale e di controllo, presupposto di una efficace azione di contenimento dell'inquinamento acustico e dell'esposizione al rumore.

La serie delle norme UNI EN ISO 140, se correttamente applicate e poste in relazione alla UNI EN ISO 717 Parte 1 e Parte 2, consente di svolgere tutte le verifiche richieste dal DPCM stesso e, quindi, mettere a disposizione dell'acquirente la certificazione di conformità dell'edificio ai requisiti richiesti in funzione dell'utilizzo.

4.2. Termini e definizioni di orientamento (UNI EN ISO 16283-1:2014)

Al fine di comprendere meglio gli esposti seguenti della normativa, sono stati riportati i termini e le relative definizioni: [17]

Livello medio di energia di pressione sonora in un ambiente;” L ”:

Dieci volte il logaritmo in base dieci del rapporto tra la media spazio-temporale del quadrato della pressione sonora e il quadrato della pressione sonora di riferimento, con la media nello spazio calcolata sulla zona centrale dell'ambiente dove la radiazione diretta da ogni altoparlante o la radiazione dal campo prossimo degli elementi di confine dell'ambiente ha un'influenza trascurabile. “ L ” è espressa in decibel.

Livello di pressione sonora nell'angolo in un ambiente; “ L_{corner} ”:

Dieci volte il logaritmo in base dieci del rapporto tra la massima media temporale della pressione sonora quadratica della serie di misurazioni degli angoli e il quadrato della pressione sonora di riferimento, per il campo di basse frequenze (bande di terzo di ottava di 50 Hz, 63 Hz e 80 Hz).

" L_{Corner} " è espresso in decibel.

Livello medio di energia di pressione sonora a bassa frequenza in un ambiente; " L_{LF} ":

Dieci volte il logaritmo in base dieci del rapporto tra la media spazio-temporale del quadrato della pressione sonora e il quadrato della pressione sonora di riferimento, nel campo di basse frequenze (bande di terzo di ottava di 50 Hz, 63 Hz e 80 Hz) dove la media nello spazio è una media ponderata che è calcolata utilizzando gli angoli dell'ambiente dove i livelli di pressione sonora sono massimi e la zona centrale dell'ambiente dove la radiazione diretta da ogni altoparlante o la radiazione dal campo prossimo degli elementi di confine dell'ambiente ha un'influenza trascurabile.

" L_{LF} " è espressa in decibel.

" L_{LF} " è una stima del livello medio di energia di pressione sonora per l'intero volume dell'ambiente.

Tempo di riverberazione; " T " : Tempo richiesto affinché il livello di pressione sonora in un ambiente si riduca di 60 dB successivamente all'interruzione della sorgente sonora.

" T " è espresso in secondi.

Livello del rumore di fondo: Livello di pressione sonora misurata nell'ambiente ricevente da tutte le emittenti eccetto l'altoparlante nell'ambiente emittente.

Microfono fisso: Microfono che è fisso nello spazio mediante l'utilizzo di un dispositivo quale, per esempio, un treppiede che lo mantiene stazionario.

Microfono a movimento continuo meccanizzato: Microfono che è spostato meccanicamente con velocità angolare approssimativamente costante su un cerchio, oppure è meccanicamente mosso lungo un percorso circolare dove l'angolo di rotazione su un asse fisso è compreso tra 270° e 360°.

Microfono a scansione manuale: Microfono fissato a un misuratore di livello sonoro portatile o a un'asta di prolunga che è spostata da un operatore umano lungo un percorso prescritto.

Microfono a impugnatura manuale: Microfono fissato a un misuratore di livello sonoro portatile o a un'asta che è impugnata manualmente in una posizione fissa da un operatore umano a una distanza di almeno un braccio di distanza dal busto del corpo dell'operatore.

Partizione: Superficie totale della partizione di separazione tra gli ambienti emittente e ricevente.

Per due ambienti che sono sfalsati orizzontalmente o verticalmente, la superficie totale della partizione di separazione non è visibile da entrambi i lati della partizione; quindi è necessario definire la partizione come la superficie totale.

Partizione comune: Parte della partizione che è comune a entrambi gli ambienti emittente e ricevente.

Isolamento acustico; "D" : Differenza dei livelli medi di energia di pressione sonora tra gli ambienti emittente e ricevente con uno o più altoparlanti nell'ambiente emittente che è calcolato utilizzando la formula:

$$D = L1 - L2$$

dove:

$L1$ è il livello medio di energia della pressione sonora nell'ambiente emittente quando il suo volume è maggiore o uguale a 25 m^3 o il livello medio di energia di pressione sonora a bassa frequenza (solo bande di 50 Hz, 63 Hz e 80 Hz) nell'ambiente emittente quando il suo volume è minore di 25 m^3 ;

$L2$ è il livello medio di energia della pressione sonora nell'ambiente ricevente quando il suo volume è maggiore o uguale a 25 m^3 o il livello medio di energia di pressione sonora a bassa frequenza (solo bande di 50 Hz, 63 Hz e 80 Hz) nell'ambiente ricevente quando il suo volume è minore di 25 m^3 .

"D" è espresso in decibel.

Isolamento acustico normalizzato rispetto al tempo di riverberazione; "D_{nT}" : Isolamento acustico normalizzato a un valore di riferimento del tempo di riverberazione nell'ambiente ricevente e calcolato utilizzando la formula:

$$D_{nT} = D + 10 \lg T/T_0$$

dove

T è il tempo di riverberazione nell'ambiente ricevente;

T_0 è il tempo di riverberazione di riferimento, per le abitazioni $T_0 = 0,5$ s.

“ D_{nT} ” è espresso in decibel.

L'isolamento acustico, è riferito a un tempo di riverberazione di 0,5 s perché nelle abitazioni con arredi il tempo di riverberazione è stato riscontrato essere ragionevolmente indipendente dal volume e dalla frequenza e con un valore circa uguale a 0,5 s. Con questa normalizzazione, D_{nT} dipende dalla direzione della trasmissione del suono se l'ambiente emittente e l'ambiente ricevente hanno volumi differenti; D_{nT} sarà maggiore quando la prova è effettuata da un ambiente emittente più piccolo a un ambiente ricevente più grande rispetto alla situazione inversa. Per questa ragione, le regolamentazioni che richiedono prove per dimostrare la conformità a un riferimento minimo di isolamento acustico per via aerea generalmente richiedono che l'ambiente più piccolo sia utilizzato come ambiente ricevente in modo che siano misurati i valori D_{nT} minimi.

“ D_{nT} ” fornisce un collegamento diretto all'impressione soggettiva dell'isolamento acustico per via aerea.

Potere fonoisolante apparente; R' : Dieci volte il logaritmo in base dieci del rapporto tra la potenza sonora W_1 , che è incidente su un elemento di prova e la potenza sonora totale trasmessa nell'ambiente ricevente se, in aggiunta alla potenza sonora W_2 trasmessa attraverso l'elemento sottoposto a prova, è significativa

la potenza sonora W_3 trasmessa dagli elementi laterali o da altri componenti.

$$R' = 10 \lg W_1/(W_2+W_3)$$

e il potere fonoisolante apparente è valutato utilizzando la formula:

$$R' = D + 10 \lg S/A$$

dove:

S è l'area della partizione comune, in metri quadrati;

A è l'area di assorbimento equivalente dell'ambiente ricevente, in metri quadri.

“ R' ” è espresso in decibel.

In genere, la potenza sonora trasmessa nell'ambiente ricevente è la somma di diversi componenti da elementi differenti (pareti, pavimento, soffitto, ecc.).

“ R' ” può essere utilizzato per confrontare le misure in opera con misurazioni di laboratorio del potere fonoisolante, R .

Rispetto a DnT ha un collegamento più debole all'impressione soggettiva dell'isolamento acustico per via aerea.

Quando R' è determinato nelle bande di 50 Hz, 63 Hz e 80 Hz utilizzando il procedimento a bassa frequenza il collegamento alla potenza sonora nella formula:

$$R' = 10 \lg W_1/(W_2+W_3)$$

non è esatto.

Area di assorbimento equivalente; "A" : Area di assorbimento acustico che è calcolata utilizzando la formula di Sabine nella formula:

$$A = 0,16 V / T$$

Dove:

V è il volume dell'ambiente ricevente, in metri cubi;

T è il tempo di riverberazione nell'ambiente ricevente.

"A" è espresso in metri quadri.

4.3. Principali esposti normativi

La normativa nazionale italiana in materia di acustica in edilizia si è evoluta nel tempo dagli anni '60, con documenti inizialmente dedicati ai soli edifici pubblici; in seguito, prima con il D.M. 5/7/1975 e poi con il D.P.C.M. 5/12/1997, il requisito acustico minimo è stato esteso anche agli edifici comuni di ogni categoria (ad eccezione di quelli industriali).

I Parametri fondamentali introdotti dall D.P.C.M. 5/12/1997, sono descritti nella seguente tabella:

Tabella 5 – Allegato A del D.P.C.M. 5/12/1997, definizione delle grandezze acustiche

Parametro	Definizione	Scopo	Norma tecnica di riferimento
R'_{w}	Potere fonoisolante apparente di elementi di separazione tra ambienti	Isolamento acustico per via aerea fra ambienti	ISO 140-4 ISO 717-1
$D_{2m,nT,W}$	Isolamento acustico standardizzato di facciata	Isolamento acustico di facciata di edifici	ISO 140-5 ISO 717-1
$L'_{n,W}$	Livello di rumore di calpestio di solai normalizzato rispetto all'assorbimento equivalente	Rumore di calpestio	ISO 140-6 ISO 717-2
L_{ASmax}	Livello massimo di pressione sonora, ponderata A con costante di tempo slow	Rumore di impianti	
L_{Aeq}	Livello continuo equivalente di pressione sonora, Ponderata A	Rumore di impianti	
T_{60}	Tempo di riverberazione	Riverberazione di ambienti chiusi	ISO 3822

I parametri sopra descritti sono indici a singolo numero: in un singolo numero (espresso in dB eccetto che per il tempo di riverberazione), viene sintetizzata la prestazione acustica di interesse. Nel caso dei primi due parametri, che esprimono un isolamento, la prestazione è tanto migliore quanto più l'indice è elevato (es. $R'W = 52dB$ è meglio di $R'W = 49dB$). Nel caso degli altri parametri (che esprimono un livello di pressione sonora), la prestazione è tanto migliore quanto più l'indice è contenuto.

Normativa nazionale vigente

La legge quadro 447/95 "legge quadro sull'inquinamento acustico" pubblicata con data 26 ottobre 1995 costituisce la pietra miliare nel settore della normativa acustica italiana. In precedenza, il D.P.C.M. 1/3/1991 aveva cercato di tamponare in forma transitoria la richiesta di un inquadramento per la complessa questione dell'acustica ambientale, riuscendoci in parte, e lasciando ancora numerose tematiche prive di una precisa definizione. La legge quadro si struttura in 17 articoli ed ha come obiettivo la tutela dell'ambiente abitativo esterno e/o interno dall'inquinamento acustico. Come ogni legge quadro, la sua caratteristica primaria è quella di definire le competenze, individuando in Regioni, Provincie e Comuni, i principali attuatori dei principi fondamentali, affidandosi, per tematiche prettamente tecniche ai decreti attuativi.

Fra le principali novità introdotte dalla Legge 447/95:

- Riconoscimento della professionalità del "tecnico competente in acustica";
- Definizione di limiti per la rumorosità ambientale;
- Obblighi a carico di Enti pubblici e privati, con scadenze temporali e sanzioni;
- Individuazione di tutte le problematiche acustiche ambientali (fra cui il rumore prodotto da strade, ferrovie, aeroporti, imbarcazioni, ecc.);

- Individuazione dei requisiti acustici degli edifici, per i quali si rimanda a due decreti attuativi relativamente alle attività di progettazione e di collaudo in opera.

L'art. 3 della suddetta legge fissa le competenze dello Stato ed in particolare, al comma 1) lettera e), al fine di ridurre l'esposizione umana al rumore, affida al Ministero dell'Ambiente, di concerto con il Ministero della Sanità e con quelli dei Lavori Pubblici e dell'Industria, l'incarico di stabilire, a mezzo decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri, i requisiti acustici delle sorgenti sonore interne agli edifici ed i requisiti acustici passivi degli edifici stessi e dei loro componenti in opera.

In ottemperanza ai disposti sopra citati, in data 22 dicembre 1997 sulla Gazzetta Ufficiale n. 297, è stato pubblicato il Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 5 dicembre 1997

“Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici”.

Sintesi del DPCM 5/12/97

Art. 1 – Campo di applicazione

L'art. 1 precisa che, in attuazione dell'art. 3 comma 1) lettera e) della Legge 26 ottobre 1995 n. 447, il decreto determina i requisiti acustici delle sorgenti sonore interne agli edifici ed i requisiti acustici passivi degli edifici e dei loro componenti in opera, al fine di ridurre l'esposizione umana al rumore.

I requisiti acustici di sorgenti sonore diverse da quelle sopra indicate vengono invece determinati da altri provvedimenti attuativi della

legge 447/95.

Art. 2 - Definizioni

Ai fini dell'applicazione del decreto gli ambienti abitativi sono distinti nelle categorie indicate nella tabella 3 del documento, di seguito riportata.

Tabella 6 – Classificazione degli ambienti abitativi (Art.2)

Categoria A	Edifici adibiti a residenza o assimilabili
Categoria B	Edifici adibiti a uffici e assimilabili
Categoria C	Edifici adibiti ad alberghi, pensioni ed attività assimilabili
Categoria D	Edifici adibiti ad ospedali, cliniche, case di cura e assimilabili
Categoria E	Edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili
Categoria F	Edifici adibiti ad attività ricreative o di culto o assimilabili
Categoria G	Edifici adibiti ad attività commerciali o assimilabili

Al comma 2) di questo articolo sono definiti componenti degli edifici sia le partizioni orizzontali che quelle verticali.

Il comma 3) definisce servizi a funzionamento discontinuo gli ascensori, gli scarichi idraulici, i bagni, i servizi igienici e la rubinetteria.

Il comma 4) definisce servizi a funzionamento continuo gli impianti di riscaldamento, aerazione e condizionamento.

Infine il comma 5) rimanda all'Allegato A del decreto la definizione delle grandezze acustiche cui fare riferimento (tabella 2 in questo documento).

Art. 3 – Valori limite

Al fine di ridurre l'esposizione umana al rumore sono indicati in

Tabella 4, qui di seguito riportata, i valori limite delle grandezze che determinano i requisiti acustici passivi dei componenti degli edifici e delle sorgenti sonore interne, definiti nell'allegato A del DPCM (tabella2 in questo documento).

Tabella 7 – Requisiti acustici passivi degli edifici, dei loro componenti e degli impianti tecnologici (Art.3)

Categorie di cui alla Tabella 3	R ² w(*)	D _{2m,n} T _w	L ² _{n,w}	L _{AS max}	L _{Aeq}
1. D	55	45	58	35	25
2. A, C	50	40	63	35	35
3. E	50	48	58	35	25
4. B, F, G	50	42	55	35	35

(*) Valori di R²w riferiti a elementi di separazione tra due distinte unità immobiliari.

Nota: per quanto riguarda l'edilizia scolastica, i limiti per il tempo di riverberazione sono quelli riportati nella normativa precedentemente emanata (Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici n. 3150 del 22 maggio 1967 e successivo Decreto Ministeriale 18 dicembre 1975, per altro non citato nel DPCM in esame).

Le grandezze di riferimento riportate alla tabella 4, che caratterizzano i requisiti acustici degli edifici, da determinare con misure in opera, sono:

- il tempo di riverberazione (T)
- il potere fonoisolante apparente di elementi di separazione

tra ambienti (R'_w).

- L'isolamento acustico standardizzato di facciata ($D_{2m,nt}$) definito da:

$$D_{2m,nT} = D_{2m} + 10 \log T/T_0$$

Dove:

$D_{2m} = L_{1,2m} - L_2$ è la differenza di livello sonoro (dB)

$L_{1,2m}$ è il livello di pressione sonora a 2 metri dalla facciata, prodotto dal rumore da traffico, se prevalente, o da altoparlante con incidenza del suono di 45° sulla facciata (dB).

L_2 è il livello di pressione sonora medio nell'ambiente ricevente (dB).

T è il tempo di riverberazione dell'ambiente ricevente in secondi.

T_0 è il tempo di riverberazione di riferimento pari a 0,5 secondi.

Dai valori $D_{2m,nT}$, espressi in funzione della frequenza, si passa all'indice di valutazione dell'isolamento acustico standardizzato di facciata ($D_{2m,nT,W}$) facendo ricorso ad un'apposita procedura.

L'indice di valutazione permette quindi di caratterizzare con un solo numero le proprietà fonoisolanti della facciata.

- il livello di calpestio normalizzato (L_n)

Dai valori L_n , espressi in funzione della frequenza (terzi di ottava), si passa all'indice L_{nW} del livello di calpestio di solaio normalizzato facendo ricorso ad una apposita procedura.

L'indice di valutazione permette quindi di caratterizzare, con un solo numero, le proprietà di isolamento del solaio ai rumori di impatto.

- LA Smax è il livello continuo equivalente di pressione sonora ponderata A, con costante di tempo slow, prodotta dai servizi a funzionamento discontinuo.
- LAeq è il livello massimo di pressione sonora ponderata A, prodotta dai servizi a funzionamento continuo.

Art. 4 – Entrata in vigore

Poiché il DPCM entra in vigore sessanta giorni dopo la sua pubblicazione sulla Gazzetta Ufficiale n. 297 del 22 dicembre 1997, lo stesso diviene operante dal 21 febbraio 1998.

In questa sede illustreremo brevemente le conseguenze pratiche che si avranno, ad esempio nell'edilizia residenziale, per rispettare l'isolamento acustico standardizzato di facciata $D_{2m,nT,w}$ il cui valore, inteso come indice di valutazione, è fissato in 40 dB.

A titolo orientativo, uscendo dai contenuti del decreto, per quanto riguarda l'isolamento acustico delle facciate, occorre considerare principalmente tre parti:

- il muro e il suo isolamento termico
- le finestre (vetro + telaio)
- i cassonetti, nel caso di sistemi tradizionali di oscuramento con tapparelle

Affinché l'influenza della parte opaca, opportunamente mediata con quella trasparente, risulti trascurabile sull'isolamento globale della parete esterna, è necessario in ogni caso che la stessa abbia un potere fonoisolante R_w superiore ai 50 dB.

Bisogna poi tenere presente che l'isolamento acustico delle facciate è pesantemente condizionato dalla presenza dei serramenti e a sua volta questi ultimi da quella dei cassonetti e dalla quantità di tenuta e dal peso dei telai.

Infatti, per ottenere un potere isolante del complesso vetro + telaio + cassonetto R_w maggiore od eguale a 40 dB, occorre per esempio:

- un vetro - camera, ben sigillato sul telaio e con la camera d'aria riempita possibilmente di uno speciale gas che ne aumenta considerevolmente il potere fonoisolante ($R_w = 40$ dB circa);
- un telaio di potere fonoisolante non inferiore a quello del vetro e quindi con R_w di 40 dB. Ciò può essere ottenuto solo con serramenti particolari, piuttosto pesanti e possibilmente a taglio termico;
- telai ermetici sia lungo i giunti tra parti mobili che tra telaio e controtelaio;
- un cassonetto con potere fonoisolante R_w 35 – 38 dB.

Da quanto esposto si evince che un potere fonoisolante del complesso telaio + vetro + cassonetto di circa 40 dB può quindi essere ottenuto solo adottando soluzioni abbastanza complesse e non ancora note alla maggior parte dei progettisti.

Un'importante osservazione per concludere: per realizzare edifici realmente protetti contro i rumori sia interni che esterni è indispensabile che:

- progettisti ed imprese acquisiscano un'adeguata cultura

nell'acustica edilizia sui materiali, sulle tecniche di insonorizzazione e sugli accorgimenti da adottare in sede di posa in opera;

- non vengano impiegati materiali isolanti non idonei ai fini acustici;
- vengano esercitati controlli sia in corso d'opera sia a lavoro finito;
- intervenga, in tutte le fasi dell'opera e cioè dal progetto all'esecuzione, una nuova figura: quello dello specialista di acustica che affianchi l'impresa e che garantisca, con la sua specifica competenza, il rispetto dei disposti della nuova normativa.

4.4. Nuovi orizzonti normativi

In fase di ricerca normativa nell'ambito dell'acustica, si è riusciti a risalire alla bozza di un nuovo decreto, giacente in tale stato dal 2012, che dovrebbe determinare i requisiti acustici prestazionali in opera degli elementi tecnici degli edifici, sia ai fini della classificazione acustica che della limitazione del rischio di disturbo da rumore agli utenti all'interno degli edifici e nelle condizioni di utilizzo autorizzate dall'ambiente abitativo. [20]

Qui di seguito sono riportati alcuni "stralci" di tale bozza al fine di sottolineare quale percorso seguirà la normativa che si avrà nel prossimo futuro e soprattutto segnalare i contenuti degli allegati che rappresentano la vera e propria rivoluzione.

Articoli importanti contenuti nella norma

Art.3 Ai fini del presente decreto gli edifici sono progettati, costruiti e modificati in modo che gli elementi che compongono gli ambienti abitativi abbiano caratteristiche acustiche adeguate per

ridurre la trasmissione del rumore aereo, del rumore impattivo e del rumore degli impianti dell'edificio.

Art.5 E' introdotta la classificazione acustica delle unità immobiliari, secondo criteri stabiliti, obbligatoria per gli edifici acusticamente conformi, per le modifiche degli elementi tecnici degli edifici acusticamente conformi e per gli edifici esistenti in caso di contenzioso o all'atto della compravendita. La classificazione acustica delle unità immobiliari prevede la qualità acustica come criterio di indirizzo mirato al raggiungimento del comfort dell'ambiente abitativo.

Art.6 La rispondenza ai valori di riferimento stabiliti dal presente decreto, anche ai fini amministrativi, deve essere valutata in fase di progetto e attestata esclusivamente con verifiche acustiche eseguite al termine dell'opera effettuate a carico del titolare dell'atto autorizzativo. La classificazione acustica delle unità immobiliari degli edifici acusticamente conformi è riportata nell'atto di compravendita.

All'interno del decreto è inoltre riportato che, le modalità e i criteri di classificazione acustica, di valutazione dei requisiti acustici e di verifica acustica sono definiti dalla norma UNI 11367/2010.

La relazione di verifica in opera e di classificazione acustica deve essere firmata da un tecnico competente in acustica ambientale e deve contenere:

- L'elenco delle norme di riferimento utilizzate;

- L'eventuale descrizione della procedura di scelta dei campioni di prova;
- La descrizione degli ambienti di prova, delle partizioni, degli impianti verificati e delle postazioni di misura;
- Le condizioni di regolazione e di funzionamento dei singoli elementi tecnici interessati dalle misurazioni;
- I rapporti relativi alle prove effettuate redatti in conformità alla normativa tecnica applicabile, i calcoli effettuati;
- Le misure di eventuali parametri secondari, influenti sui parametri oggetto di valutazione;
- Nel caso di utilizzo delle tecniche di campionamento, i calcoli relativi alla determinazione dell'incertezza, con l'espressa indicazione del livello di fiducia utilizzato per i calcoli;
- I risultati ottenuti relativamente ai valori utili degli indici indicati dal presente decreto e dell'indice unico di classificazione dell'unità immobiliare;
- La firma del responsabile del rapporto di prova.

Allegati importanti contenuti nella norma

Come detto in precedenza la parte importante di questo decreto è rappresentata dagli allegati:

ALLEGATO A: requisiti acustici delle unità immobiliari,

La classificazione acustica di tutte le unità immobiliari oggetto del presente decreto, con la sola eccezione degli ospedali e delle

scuole, viene effettuata considerando i seguenti requisiti acustici:

- Isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione;
- Potere fonoisolante apparente fra differenti unità immobiliari;
- Livello sonoro di calpestio fra differenti unità immobiliari, normalizzato rispetto all'area equivalente di assorbimento acustico;
- Livello sonoro equivalente degli impianti a funzionamento continuo, normalizzato rispetto al tempo di riverberazione;
- Livello sonoro massimo degli impianti a funzionamento discontinuo, normalizzato rispetto al tempo di riverberazione.

Tabella 8 – Classificazione acustica di unità immobiliari in funzioni dei requisiti prestazionali

Classe	Indici di valutazione				
	a) Isolamento acustico normalizzato di facciata	b) potere fonoisolante apparente di partizioni verticali e orizzontali fra ambienti di differenti unità immobiliari	c) livello di pressione sonora di calpestio normalizzato fra ambienti di differenti unità immobiliari	d) Livello sonoro corretto immesso da impianti a funzionamento continuo	e) Livello sonoro corretto immesso da impianti a funzionamento discontinuo
	$D_{2m,nT,W}$ dB	R'_{W} dB	L'_{nW} dB	L_{ic} dB(A)	L_{id} dB(A)
I	≥43	≥56	≥53	≥25	≥30
II	≥40	≥53	≥58	≥28	≥33
III	≥37	≥50	≥63	≥32	≥37
IV	≥32	≥45	≥68	≥37	≥42

Tabella 9 – Classificazione acustica di unità immobiliari in funzione di ulteriori requisiti prestazionali da applicare in caso di destinazione d'uso ricettiva

Indici di valutazione		
Classe	f) Isolamento acustico normalizzato di partizioni verticali e orizzontali fra ambienti della stessa unità immobiliare	g) Livello di pressione sonora di calpestio normalizzato fra ambienti della stessa unità immobiliare
	$D_{nT,W}$ dB	L'_{nW} dB
I	≥ 56	≥ 53
II	≥ 53	≥ 58
III	≥ 50	≥ 63
IV	≥ 45	≥ 68

Tabella 10 – Valori di riferimento minimi per l'isolamento di facciata in riferimento alla classificazione acustica territoriale

Livello prestazionale	Indice di valutazione dell'isolamento acustico normalizzato rispetto ad ambienti di uso comune o collettivo collegati mediante accessi o aperture ad ambienti abitativi $D_{nT,W}$ (dB)	
	Ospedali e scuole	Altre destinazioni d'uso
Prestazione ottima	≥ 34	≥ 40
Prestazione buona	≥ 30	≥ 36
Prestazione di base	≥ 27	≥ 32
Prestazione modesta	≥ 23	≥ 28

Tabella 11 – Requisiti per l'isolamento acustico normalizzato rispetto ad ambienti di uso comune o collettivo dell'edificio collegati mediante accessi o aperture ad ambienti abitativi

Classe acustica prevista dalla zonizzazione acustica comunale (e fasce di pertinenza delle infrastrutture dei trasporti aventi valori limite corrispondenti a tale classe)	Classe acustica minima di isolamento acustico di facciata ($D_{2m,nT,W}$)
I, II, III	II (III*)
IV	II
V e VI	I

* Fino al 31 dicembre 2013

L'entrata in vigore di un tale decreto potrebbe donare all'acustica, ulteriore importanza nel settore edile fin dalla fase progettuale, avvicinando l'aspetto di valutazione acustica a quello attuale di valutazione energetica, come requisito prestazione e fattore di qualità edilizia ulteriormente determinante.

4.5. Sintesi evolutiva della legislazione Italiana ed Europea

D.P.C.M. 1/3/91 "Limiti massimi di esposizione al rumore negli ambienti abitativi e nell'ambiente esterno;

Decreto Legislativo n. 277 "attuazione delle direttive n. 80/1107/cee, n. 82/605/cee, n. 83/477/cee, n. 86/188/cee n. 88/642 in materia di protezione dei lavoratori contro i rischi derivanti da esposizione ad agenti chimici, fisici e biologici durante il lavoro, a norma dell'art. 7 della legge 30 luglio 1990, n. 212".

Decreto Legislativo n. 137 "Livello di potenza acustica del rumore prodotto nell'ambiente atmosferico e di pressione acustica del

rumore propagato nell'aria e misurato sul posto di guida ammessi per le gru a torre utilizzate per compiere lavori nei cantieri industriali ed edili”.

Legge 26 Ottobre 1995 n. 447 “Legge Quadro sull'inquinamento acustico”

Decreto 11/12/1996 “Applicazione del criterio differenziale per gli impianti a ciclo produttivo continuo”.

D.P.C.M. 18 Settembre 1997 – Determinazione dei requisiti delle sorgenti sonore nei luoghi di intrattenimento danzante.

Decreto 31 Ottobre 1997 – Metodologia di misura del rumore aeroportuale.

D.P.C.M. 14 Novembre 1997 – Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore.

D.P.C.M. 5 Dicembre 1997 – Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici.

Decreto 11 Dicembre 1997 n. 496 – Regolamento recante norme per la riduzione dell'inquinamento acustico degli aereo mobili civili.

D.P.C.M. 19 Dicembre 1997 – Proroga dei termini per l'acquisizione delle apparecchiature di controllo e registrazione nei luoghi di intrattenimento danzante e di pubblico spettacolo di cui al decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 18 Settembre 1997.

Decreto 16 Marzo 1998 – Tecniche di rilevamento e di misurazione dell'inquinamento acustico.

D.P.C.M. 31 Marzo 1998 – Tecnico Competente.

D.P.R. n. 459 – 18 Novembre 1998 – regolamento recante norme di esecuzione dell'articolo 11 della legge 26 Ottobre 1995, 447, in materia di inquinamento acustico derivante dal traffico ferroviario.

Estratto legge 9 Dicembre 1998, n. 426, Nuovi interventi in campo ambientale.

D.P.C.M. 16 Aprile 1999 n. 215 – Regolamento recante norme per la determinazione dei requisiti acustici delle sorgenti sonore nei luoghi di intrattenimento danzante e di pubblico spettacolo e nei pubblici esercizi.

Decreto 20 Maggio 1999 – Criteri per la progettazione dei sistemi di monitoraggio per il controllo dei livelli di inquinamento acustico in prossimità degli aeroporti nonché criteri per la classificazione degli aeroporti in relazione al livello di inquinamento acustico.

Decreto Legislativo 27 Luglio 1999 n. 271 “Adeguamento della normativa sulla sicurezza e salute dei lavoratori marittimi a bordo delle navi mercantili da pesca nazionali, a norma della legge 31 Dicembre 1998, n. 485”.

D.P.R. 9 Novembre 1999 n. 476 – “Regolamento recante modificazioni al decreto del Presidente della Repubblica 11 Dicembre 1997, n. 496 concernente il divieto dei voli notturni.

Decreto 3 Dicembre 1999 – “Procedure antirumore e zone di rispetto negli aeroporti”.

Decreto legislativo 4 Agosto 2000 - Disposizioni modificative e correttive del decreto legislativo 4 agosto 1999, n. 345, in materia di

protezione dei giovani sul lavoro.

Decreto 29 Novembre 2000 – Criteri per la predisposizione, da parte delle società e degli enti gestori dei servizi pubblici di trasporto o delle relative infrastrutture, dei piani degli interventi di contenimento e abbattimento del rumore.

D.P.R. 3 Aprile 2001, n. 304 – “Regolamento recante disciplina delle emissioni sonore prodotte nello svolgimento delle attività motoristiche a norma dell'art. 11 della legge 26 novembre 1995 n. 447”.

Direttiva 2000/14/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio dell'8 Maggio 2000 sul ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri concernenti l'emissione acustica ambientale delle macchine ed attrezzature destinate a funzionare all'aperto.

Decreto 23 Novembre 2001 Modifiche dell'allegato 2 del decreto ministeriale 29 novembre 2000 – Criteri per la predisposizione, da parte delle società e degli enti gestori dei servizi pubblici di trasporto e delle relative infrastrutture, dei piani degli interventi di contenimento e abbattimento del rumore (G. U. 288 del 12/12/2001).

Decreto 14 dicembre 2001 – Autorizzazione ad emettere certificazione CE di conformità in materia di emissione acustica ambientale all'organismo Novicom sas in Monte Marenzo.

Decreto 14 dicembre 2001 – Autorizzazione ad emettere certificazione CE di conformità in materia di emissione acustica

ambientale all'organismo Consorzio DNV – Modulo Uno, in Torino.

Decreto 14 dicembre 2001 – Autorizzazione ad emettere certificazione CE di conformità in materia di emissione acustica ambientale all'organismo ECO spa in Faenza.

Legge n. 179 del 13 Luglio 2002 – Disposizioni in materia ambientale.

Decreto legislativo 4 Settembre 2002, n. 262 – Attuazione della direttiva 2000/14/CE concernente l'emissione acustica ambientale delle macchine ed attrezzature destinate a funzionare all'aperto.

Direttiva 2003/10/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 6 Febbraio 2003 sulle prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (rumore) diciassettesima direttiva particolare ai sensi dell'art. 16, paragrafo 1, della direttiva 89/391

Elenco UNI EN ISO

UNI EN ISO 140

Acustica – Misura dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio

Parte 1 – Requisiti per le attrezzature di laboratorio con soppressione della trasmissione laterale;

Parte 3 – Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico per via aerea di elementi di edificio;

Parte 4 – Misurazioni in opera dell'isolamento acustico per via aerea tra ambienti;

Parte 5 – Misurazioni in opera dell'isolamento acustico per via aerea

degli elementi di facciata e delle facciate;

Parte 6 – Misurazioni in laboratorio dell'isolamento dal rumore di calpestio di solai;

Parte 7 – Misurazioni in opera dell'isolamento dal rumore di calpestio di solai;

Parte 8 – Misurazione in laboratorio della riduzione del rumore di calpestio trasmesso da rivestimenti di pavimentazioni su un solaio pesante normalizzato.

UNI EN 20140

Acustica – Misura dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio

Parte 2 – Determinazione, verifica e applicazione della precisione dei dati;

Parte 9 – Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico per via aerea da ambiente e ambiente coperti dallo stesso controsoffitto;

Parte 10 – Misura in laboratorio dell'isolamento acustico per via aerea di piccoli elementi di edificio.

UNI EN ISO 717

Acustica – Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio

Parte 1 – Isolamento di rumori aerei

Parte 2 – Isolamento di rumore di calpestio

UNI EN 29052 – 1

Acustica – Determinazione della rigidità dinamica. Materiali utilizzati

sotto i pavimenti galleggianti negli edifici residenziali.

UNI EN ISO 11654

Acustica – Assorbitori acustici per l'edilizia – Valutazione dell'assorbimento acustico

UNI EN ISO 140 – 12:2001

Acustica – Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio – Misurazione in laboratorio dell'isolamento acustico dai rumori trasmessi per via aerea e dal calpestio tra due ambienti attraverso un pavimento sopraelevato.

UNI EN ISO 3382:2001

Acustica – Misurazione del tempo di riverberazione di ambienti con riferimento ad altri parametri acustici.

UNI EN 12354 – 1:2002

Acustica in edilizia – Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti – Isolamento dal rumore per via aerea tra ambienti.

UNI EN 12354-2:2002

Acustica in edilizia – Valutazione delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti – Isolamento acustico al calpestio tra ambienti.

UNI EN 12354 – 3:2002

Acustica in edilizia – Valutazione delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti – Isolamento acustico contro il rumore proveniente dall'esterno per via aerea.

UNI EN 12354 – 4:2003

Acustica in edilizia – Valutazione delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti – - Trasmissione del rumore interno all'esterno.

UNI EN 12549:2001

Acustica – Procedure per prove di rumorosità degli utensili per l'inserimento di elementi di fissaggio – Metodo tecnico progettuale.

EN ISO 16283-1:2014

Elaborato dal comitato Tecnico ISO/TC43 “Acustica” in collaborazione con il Comitato Tecnico CEN/TC126 “Misure in opera dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio”. La norma sostituisce le UNI EN ISO 140 -7, 140-5, 140-4, e 140-14.

5. Caso studio: edificio 2 Politecnico di Milano

5.1. Edificio n°2 - "Bruno Finzi"



Figura 19 - Foto stato attuale Edificio 2



Figura 20 – Foto storica degli edifici affacciati su piazzale Leonardo da Vinci (fine anni '30)

5.1.1. Cenni storici e collocazione edificio

L'edificio è stato realizzato verso la fine degli anni '20, contemporaneamente a gran parte dei manufatti che compongono il Campus Leonardo, sezione storica del Politecnico di Milano.



Figura 21 - Foto storica aerea del Campus Leonardo (fine anni 30)

Il fabbricato presenta un impianto a corte con un cortile interno, porticato sui quattro lati che lo compongono. Lo sviluppo segue l'asse nord-sud, presentando i fronti principali a nord su piazza Leonardo da Vinci e a sud verso l'edificio n°2A del Politecnico. La posizione del manufatto fa intuire l'importanza che esso ricopre all'interno del campus.

L'edificio del Rettorato si trova pochi metri più a sud, mentre a nord,



Figura 22 - Foto stato attuale da piazzale Leonardo da Vinci

oltrepassando via Bonardi, si incontra un'altra struttura storica del Politecnico di Milano, ovvero la facoltà di Architettura. Lo stile in cui questo manufatto è stato progettato si confà a quello utilizzato per tutti gli edifici del campus Leonardo ed in particolar modo riprende le volumetrie del fabbricato n°3, costituendone di fatto un edificio gemello. L'impronta neoclassica è chiara, come chiara è l'intenzione di conferire e signorilità tramite un'architettura elegante e allo stesso tempo imponente. Sul fronte nord sono presenti dei volumi, leggermente avanzati rispetto al corpo di fabbrica, sui quali trova posto un ordine di lesene a doppia altezza che va ad unire il piano terra e il primo in modo da dare magnificenza e un grande senso di importanza all'edificio nel suo complesso. Il prospetto viene

allungato e slanciato verso l'alto tramite l'utilizzo di un parapetto a balaustra che cinge la copertura a padiglione al di sopra dei due corpi appena descritti. La parte centrale del fronte è invece più sobria con aperture ad arco al piano terra e rettangolari al piano primo. Il prospetto est ed ovest invece sono caratterizzati da un doppio ordine di aperture ad arco, che al piano primo vengono tamponate tramite dei finestroni con telaio in legno.

Infine il fronte a sud che, a causa della presenza del piano secondo, risulta essere più ampio ed alto degli altri. Attraversando il cortile si possono notare due corpi a nord e a sud in aggetto sul cortile stesso. Tali locali sono attualmente adibiti ad uffici e aule didattiche. La composizione in facciata di questi elementi richiama i fronti esterni, dando un senso di armonia e omogeneità a tutto l'edificio.

Qui di seguito sono riportate alcune immagini relative a quanto appena descritto.



Figura 23 - Edificio 2, foto facciate rivolte rispettivamente a est e nord

5.1.2. Modifiche architettoniche nel corso degli anni

Dalla sua costruzione l'edificio n°2 del politecnico ha subito numerose modifiche, già a partire dai primi anni di vita.

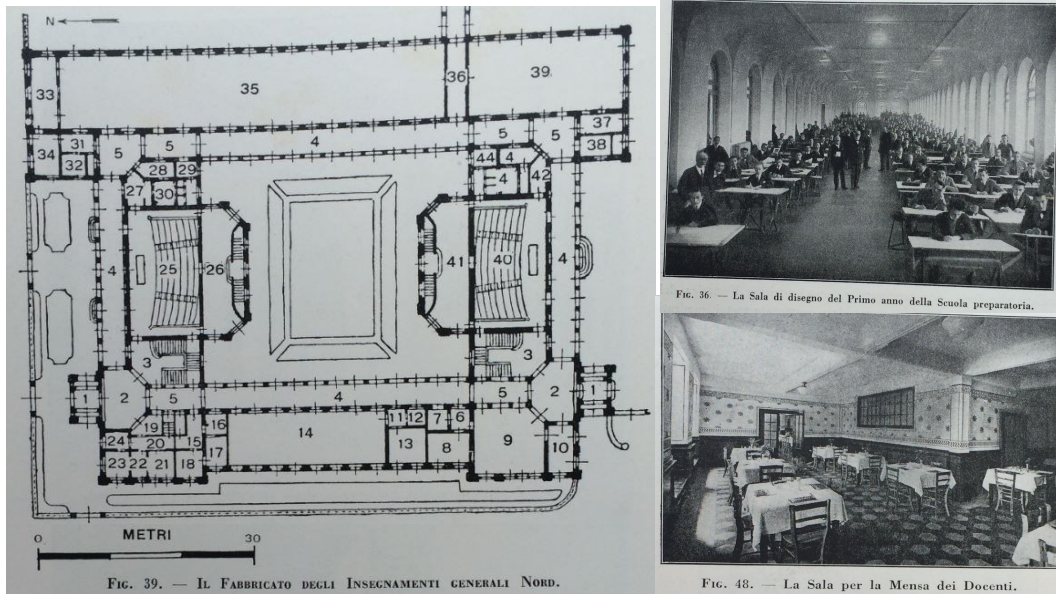


Figura 24 Pianta edificio 2 tratta dal progetto originale; foto storiche di un 'aula da disegno (in alto a destra) e della mensa dei professori (in basso a destra) entrambe situate nell' edificio 2

Nonostante fosse stato progettato con spazi sovrabbondanti per l'epoca, dopo soli 13 anni la struttura non era più sufficiente a contenere tutti gli studenti. Per cui nel 1948 (i lavori furono studiati nei primi anni '40, ma rinviati a causa del conflitto mondiale) si realizzarono degli ampliamenti: il grane terrazzo che affacciava su piazza Leonardo da Vinci fu chiuso per costruire un'altra aula da disegno e anche la stecca posteriore fu sopralzata per creare altri spazi.

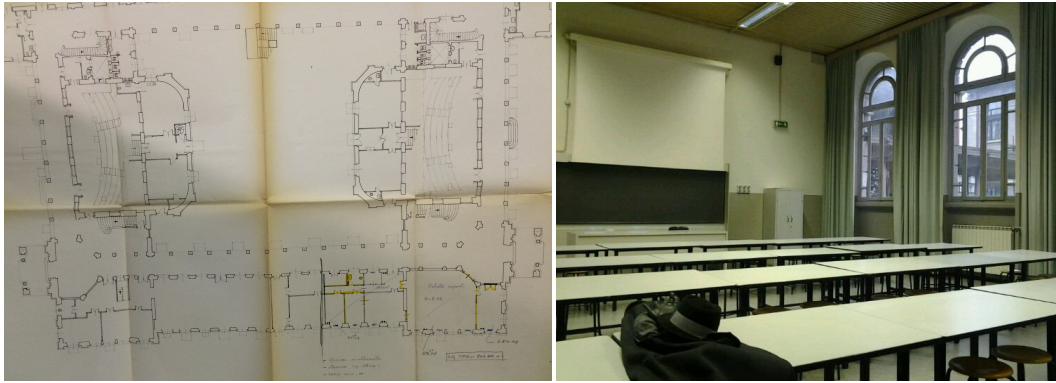


Figura 25 - foto del progetto del piano soppalco (anni 80); foto recente di un'aula (a destra)

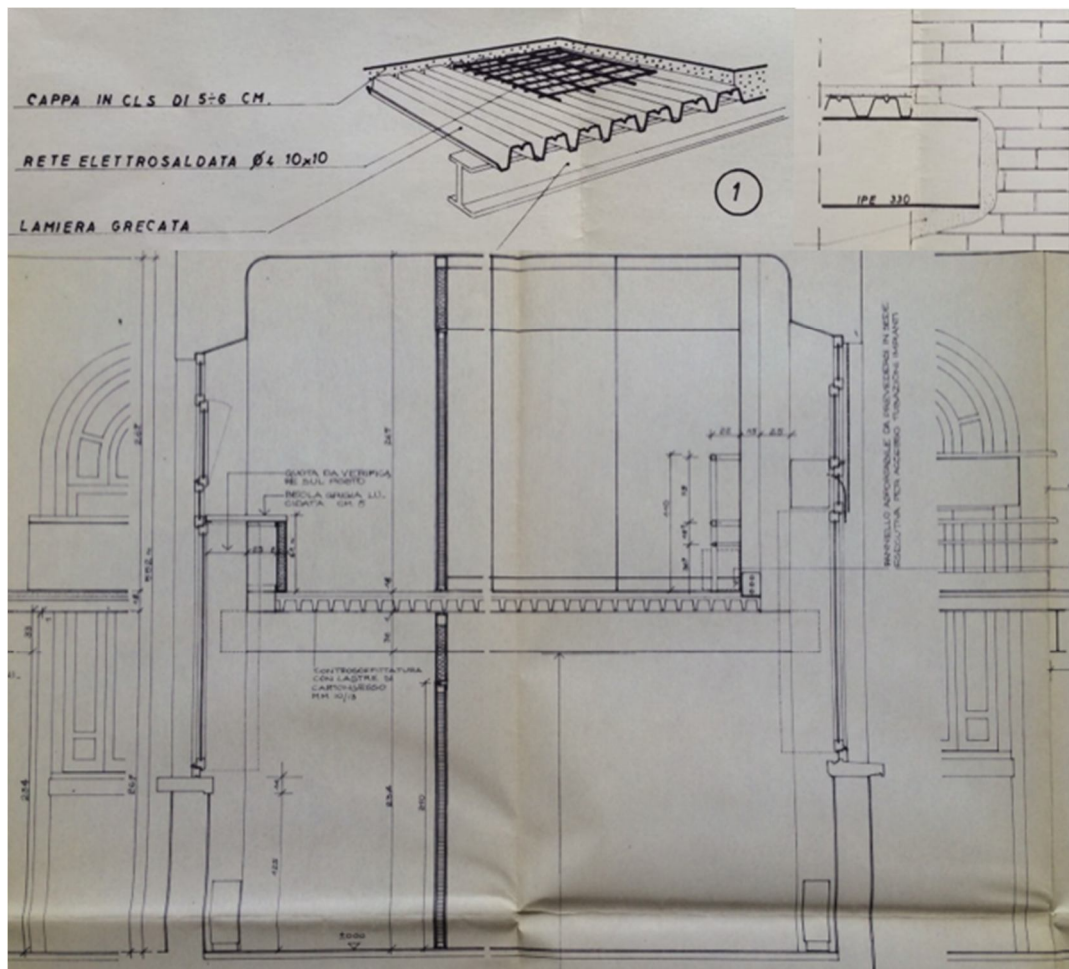


Figura 26 – Foto da progetto esecutivo de solaio di divisione del piano terra con particolari esecutivi della struttura portante (1987)

Oltre alle innumerevoli modifiche interne (consistenti in piccole variazioni di tavolati e la realizzazione di altre due scale che portano al primo piano) verso la fine degli anni 80' vennero costruiti delle partizioni orizzontali per dividere in due sottolivelli il piano terra, furono così realizzati dei veri e propri piani soppalcati (figura 25).

La struttura portante in travi di acciaio con soletta in lamiera grecata e getto collaborante di CLS è la medesima per tutti i lati dell'edificio, si differenziano invece le chiusure trasparenti e le finiture interne.

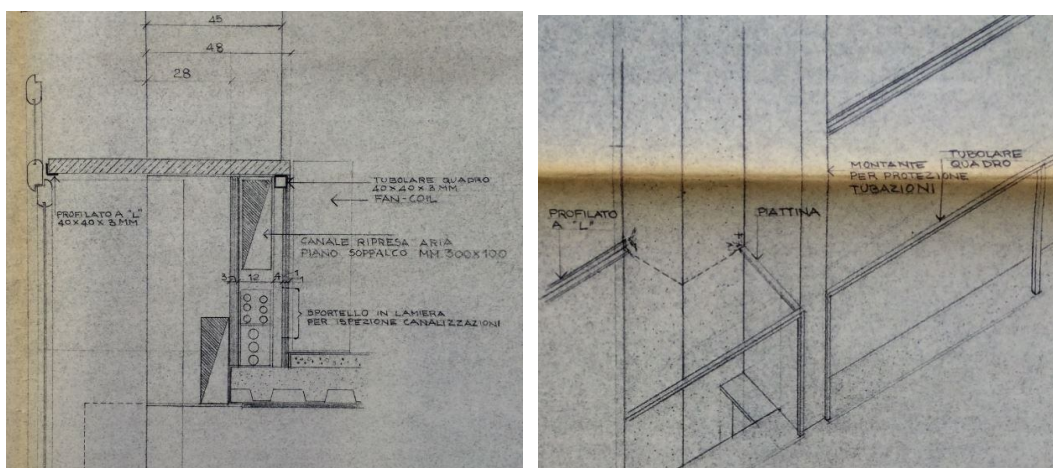


Figura 27 - Progetto esecutivo del nodo tra solaio e infissi (prima ipotesi studiata nel 1991)

Da quello che si evince dalle relazioni tecniche allegate al progetto si intuisce come fin dal principio si siano posti il problema di come dividere definitivamente i due livelli senza dover modificare il serramento esterno (a causa del vincolo architettonico imposto dalla soprintendenza dei beni culturali per cui non è possibile modificarli). Nella relazione tecnica allegata il progettista dichiara

apertamente che a causa di tempistiche troppo stringenti realizzerà il solaio sul filo interno della strombatura della finestra, così da consentire sia l'apertura del serramento che la posticipazione della risoluzione del suddetto problema che verrà momentaneamente ovviato lasciando in essere i serramenti esistenti e realizzando un parapetto al piano superiore in corrispondenza degli stessi.

All'interno delle tavole dei particolari costruttivi allegati al progetto trova posto anche una prima soluzione per la separazione dei due livelli che però non sarà, mai realizzata.

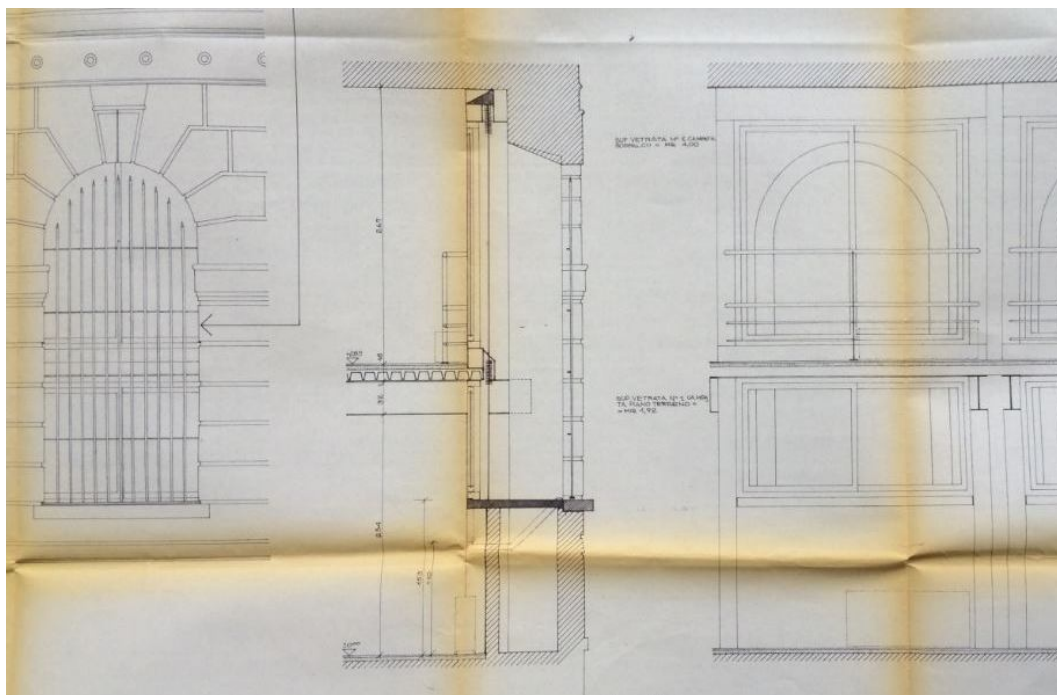


Figura 28 - Progetto esecutivo per la realizzazione di un doppio serramento mai realizzato (Progetto 1990)

Successivamente, nei primi anni '90 fu studiata e realizzata la chiusura esistente, essa si compone di un pannello multistrato di sp. 4 cm appoggiato su di un "carter" metallico e dei profili a "L" incastrati con dei tasselli al perimetro murario ed al montante del

serramento. Le sigillature sono realizzate con del silicone e in alcuni punti sono stati posti inferiormente dei materassini di materiale poroso fonoassorbente.



Figura 29 - Foto del profilo ad "L" della soluzione realizzata a fine anni 90

L'ultimo intervento di modifica è stato realizzato nel 2004, anno in cui fu costruito un ampliamento al soppalco esistente e fu riqualificata tutta la parte meridionale della stecca prospiciente la piazza Leonardo da Vinci. Proprio perché l'intervento di riqualificazione ha interessato solo la parte sud ad oggi abbiamo due livelli di finiture diverse tra le due zone del fabbricato.



Figura 30 - Foto interne della parte meridionale soggetta all'intervento di modifica nel 2004



Figura 31 - Foto dal piano soppalco del particolare modificato nel 2004

5.1.3. Descrizione elementi tecnici

Dal punto di vista strutturale il manufatto vede nella sua realizzazione il largo impiego del mattone pieno che si ritrova lungo tutto lo sviluppo verticale dell'edificio.



Figura 32 - Foto esterna dell'edificio interessato

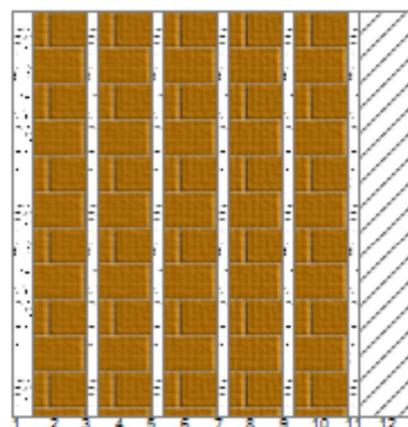


Figura 33 - Particolare tecnico della muratura

Al piano interrato gli spessori dei paramenti murari sono molto ampi, arrivando a raggiungere anche il metro in corrispondenza di muri a sei teste. Il piano primo invece vede spessori più contenuti intorno ai 45 cm.

L'ala est poi è caratterizzata da un sopralzo costituito da una struttura a telaio travi-pilastri in calcestruzzo armato con copertura a falda inclinata verso la corte interna.



Figura 34 - Vista aerea verso ovest



Figura 35 - Vista aerea verso nord

Ai piani inferiori l'elevato spessore dei muri è giustificato dalla necessità statiche dell'edificio. Sono, infatti, presenti strutture spingenti quali archi e volte a botte e a crociera. I solai però sono in grande parte ricoperti da controsoffitti in molti casi sfruttati per il posizionamento di corpi scaldanti e/o parte dell'impianto illuminante.



Figura 36 – Archi e volte presenti ai piani inferiori

I serramenti presenti nell'edificio sono di forme e composizioni eterogenee. Al piano seminterrato si trovano ancora esempi di finestrate con vetro singolo e telaio in ferro, quasi completamente sostituite da elementi con vetro camera e telaio in alluminio. Al piano terra e primo i grandi finestroni con sopra luce semicircolare che si trovano sui prospetti esterni e verso la corte interna possono essere caratterizzati sia da vetro singolo con telaio in legno, struttura originale di tutti i serramenti fuori terra, che da elementi in cui si è provveduto a sostituire i vetri originali con vetro camera nelle zone in passato oggetto di interventi di recupero. Al piano secondo sono invece presenti dei finestroni rettangolari con vetro singolo e

struttura in alluminio, sostituiti solo nella parte a sud da serramenti con vetrocamera.



Figura 37 – Foto degli infissi attualmente installati

5.2. Problematiche acustiche

5.2.1. Riscontro dis-comfort acustico

Durante il nostro tirocinio presso gli uffici AGIS (Area Gestione Infrastrutture e Servizi) del Politecnico di Milano abbiamo potuto sia monitorare i guasti registrati dal call center sia incontrare direttamente i fruitori degli uffici situati nell'ed. 2. Tra i disagi riscontrati più frequenti, oltre al malfunzionamento degli impianti di climatizzazione (che per altro sono oggetto di rinnovamento e sui quali l'impresa CPL Concordia sta già operando), si è evidenziato un notevole dis-comfort a livello acustico tra il piano terra e il piano soppalco. La questione si è rivelata di grande importanza proprio perché questi ambienti sono oggetto di riqualificazione edilizia a causa dell'imminente trasferimento delle presidenze di ingegneria. Una volta contattati i precedenti fruitori degli spazi ed accertato in loco il reale disagio relativo al ponte acustico esistente tra i due

livelli si è deciso di procedere ad un'analisi dettagliata del problema. Il nostro studio vuole essere un "Modello replicabile" che si adatti a tutte le situazioni simili che si ripropongono all'interno degli altri edifici del campus che si trovano nella medesima situazione.

5.2.2. Esigenze della committenza

I nuovi fruitori dei locali oggetto di studio hanno avanzato la richiesta di una maggiore privacy fra gli ambienti ed un livello accettabile di isolamento acustico fra gli stessi. Allo stato attuale l'abbattimento acustico delle chiusure esistenti è realmente insufficiente a garantire sia la privacy degli utenti che il comfort ottimale del luogo di lavoro dei vicini poiché sono costretti a lavorare con un fastidioso brusio di fondo. Proprio partendo da queste esigenze unitamente con i deficit registrati dai precedenti utenti si è deciso di indirizzare la progettazione verso la risoluzione del ponte acustico esistente.

6. Rilievo acustico pre- intervento

6.1. Introduzione al rilievo acustico

Al fine di acquisire quanti più informazioni possibili e dati tecnici per meglio approcciare il progetto di intervento, soprattutto per la soluzione definita critica sotto l'aspetto acustico, il 17 giugno si è svolto, grazie alla collaborazione del prof. Moschioni, ed alla strumentazione fornita, il rilievo acustico dei locali all'interno dell'edificio interessato dall'intervento di riqualificazione. La metodologia utilizzata dal tecnico che ha svolto le misurazioni, nonché assistente del suddetto professor Moschioni, trova riferimento nelle norme tecniche UNI EN ISO che verranno di seguito citate ed utilizzate per esporre l'attività svolta.

Il poter svolgere un rilievo pre-intervento risulta essere di estrema importanza per il nostro lavoro, in quanto ci permetterà di effettuare le opportune scelte in ambito progettuale, scegliendo materiali con adeguate caratteristiche per creare così una soluzione in grado di poter migliorare le performance acustiche in considerazione delle altre variabili imposte dalla committenza (es. budget di spesa limitato per i materiali da impiegare, tempistiche di intervento ristrette).

6.2. Riferimenti normativi per la misura in laboratorio ed in opera delle prestazioni acustiche di materiali e componenti

L'attività normativa nel campo dell'acustica nasce e si sviluppa essenzialmente in base all'esigenza di contrastare, sotto il profilo tecnico, gli aspetti negativi legati alle varie forme di inquinamento da rumore, che sempre più insidiano il benessere e la salute collettiva di un numero crescente di persone e di comunità.

Tra molti campi di interesse in cui la normativa acustica nazionale e internazionale si è, per tale finalità, articolata negli ultimi decenni, uno dei più consolidati, per esperienza e competenze accumulate, è quello relativo alla definizione, alla caratterizzazione e al miglioramento dei requisiti acustici passivi degli edifici, sia residenziali che comunitari, al fine di salvaguardare la vita e le attività svolte al loro interno dal disturbo di rumori provenienti sia dall'esterno che dall'interno stesso dell'edificio.

Attualmente il cardine fondamentale della normativa acustica in campo edilizio è costituito da un insieme di norme prodotte dall'ISO, e in particolare dalla famiglia delle norme ISO-140, nelle quali sono raccolte le procedure normalizzate di tutte le misure, da eseguirsi in laboratorio e/o in opera, necessarie per caratterizzare in modo adeguato sotto il profilo acustico, sia i vari ambienti di un edificio, sia ogni suo singolo componente strutturale e impiantistico.

Le norme che rappresentano l'avvenuto recepimento dall'ente normativo nazionale (siglate UNI), sono molte, ed esaminarle tutte in quest'ambito non è possibile, anche se la loro conoscenza approfondita, va sottolineato, è un requisito praticamente indispensabile per chi si occupa, o intende occuparsi, di acustica edilizia.

Si è voluto perciò trattare solo alcune norme particolarmente significative per il fine pratico del nostro elaborato, e cioè: la UNI EN ISO 140-3, riguardante la misura in laboratorio del potere fonoisolante di divisori, e la 140-4 riguardante la stessa misura in opera; infine, le UNI EN ISO 140-6, 140-7 e 140-8, riguardanti la misura dell'isolamento al calpestio di solai e di rivestimenti di pavimenti in laboratorio e in opera. Oltre a queste saranno esaminate le norme UNI EN ISO 717-1, 717-2 e UNI EN ISO 11654 relative al calcolo dell'indice di valutazione dell'isolamento acustico per via aerea, dell'isolamento del rumore di calpestio e dell'assorbimento acustico.

È necessario precisare che alcune di queste norme, come in precedenza introdotto, sono state sostituite dalla UNI EN ISO 16283-1 del 2014, precisamente la UNI EN ISO 140-14, la 140-4 (Misurazioni in opera dell'isolamento acustico per via aerea tra ambienti), la 140-5 (Misurazioni in opera dell'isolamento acustico per via aerea degli elementi di facciata e delle facciate) e la 140-7 (Misurazioni in opera dell'isolamento dal rumore di calpestio di solai). Per quanto

riguarda il caso pratico quindi si è fatto riferimento alla normativa UNI più recente.

Misura in laboratorio del potere fonoisolante secondo la norma UNI EN ISO 140-3

Uno degli aspetti di maggior disagio che deriva dal raggruppamento di numerose unità abitative in un unico edificio è indubbiamente il disturbo da suoni e da rumori di vario genere che si trasmettono, non voluti, da un appartamento all'altro; o che prodotti dall'esterno, penetrano attraverso le facciate, all'interno delle abitazioni. La realizzazione quindi di divisori verticali e orizzontali, in grado di ridurre al minimo il passaggio per via aerea di rumori indesiderati, costituisce un requisito irrinunciabile per un'edilizia sensibile ad una reale tutela della tranquillità e della riservatezza di ogni singola abitazione. Fondamentale quindi risulta conoscere, già in sede di progetto, i dati sperimentali d'isolamento acustico, o meglio, il potere fonoisolante, che i divisori verticali ed orizzontali progettati, o che si intende adottare, sono in grado di assicurare. Tutto ciò per verificare l'adeguatezza, sia rispetto alla tipologia dell'ambiente abitativo, che si intende realizzare, sia rispetto alle caratteristiche acustiche della destinazione urbanistica della zona in cui l'edificio viene costruito.

Senza addentrarsi negli aspetti troppo tecnici della norma sopra citata, è giusto essere a conoscenza di come deve essere allestito un laboratorio indicato per le prove acustiche.

Il laboratorio infatti deve disporre di due camere semiriverberanti adiacenti, aventi una parete in comune, nella quale è contenuta un'apertura di "prova". Le due camere devono essere adiacenti ma acusticamente disaccoppiate, al fine di ridurre al minimo la trasmissione laterale del suono e di assicurare che il passaggio di energia sonora da un ambiente all'altro avvenga quasi esclusivamente attraverso l'apertura di "prova". Inoltre, le pareti devono essere strutture pesanti in grado di assicurare un elevato isolamento rispetto ai rumori esterni e quindi un basso rumore di fondo soprattutto nell'ambiente di ricezione. Le caratteristiche di questi ambienti di prova, specialmente per quanto riguarda i volumi e le dimensioni dell'apertura di "prova" che, ad esempio, non può essere inferiore a 10 m², devono rispettare i requisiti stabiliti dalla norma di carattere generale UNI EN ISO 140-1.

Il principio di misura del potere fonoisolante è relativamente semplice, più complessa invece è la sua realizzazione pratica. Una volta installato nell'apposita apertura il campione di divisorio in "prova", nella camera definita trasmittente, si produce, mediante una sorgente omnidirezionale alimentata con suono bianco, un segnale sonoro con un livello di pressione sonora d'ampiezza costante nella banda di frequenza compresa tra 63 Hz e 5 kHz. Questo segnale viene rilevato, nella stanza trasmittente e in quella ricevente, mediante due postazioni microfoniche, che nel caso specifico sono costituite, ognuna, da un microfono posto su un'asta

rotante. I due microfoni sono collegati ad un analizzatore digitale di spettro in tempo reale a più canali, mediante il quale si determina, oltre ai livelli di pressione sonora, la distribuzione spettrale dei segnali esistenti nei due ambienti. I risultati della misura del potere fonoisolante R , non solitamente espressi in bande di 1/3 d'ottava, nel campo di frequenza compreso tra 100Hz e 5 kHz. Naturalmente tanto più elevati sono questi valori, tanto maggiore, e quindi migliore, sarà l'isolamento acustico assicurato dal campione in esame.

Misura in laboratorio dell'isolamento del rumore di calpestio secondo le norme UNI EN ISO 140-6 e UNI EN ISO 140-8

La misura del potere fonoisolante dei divisori verticali e orizzontali di un edificio serve a conoscere quanto queste strutture siano in grado di ridurre la trasmissione per via aerea dei rumori indesiderati provenienti dall'interno e dall'esterno. Ma assieme a questa possibile fonte di disturbo acustico nei locali, ne può esistere un'altra non meno diffusa e fastidiosa: il cosiddetto rumore di calpestio, ovvero i rumori che si trasmettono da un'ambiente all'altro conseguentemente all'impatto di un corpo, su una superficie solida. A determinare questo fenomeno sono le vibrazioni meccaniche indotte sulle strutture rigide, specialmente sui solai, da urti e sollecitazioni di varia natura che possono essere generati nei locali abitativi. Ma di tutte le possibili fonti di vibrazioni domestiche, quella senza dubbio più comune e diffusa, e da cui deriva il nome

stesso della prova, è in definitiva quella determinata dal calpestio sui pavimenti. Anche in questo caso, risulta essere di grande importanza per il progettista, conoscere e poter comparare a priori l'efficacia delle varie soluzioni che si prospettano.

Come per la misura del potere fonoisolante, anche questa misura si avvale di due camere semiriverberanti, che però in questo caso sono sovrapposte l'una sull'altra, ma sempre realizzate in modo tale da risultare acusticamente ed elasticamente disaccoppiate.

Nel solaio in comune alle due camere è sistemata l'apertura di "prova", nella quale è possibile installare o un interno solaio, o una soletta di riferimento in calcestruzzo, le cui caratteristiche sono specificate nella relativa norma, sulla quale vanno posati i rivestimenti di pavimenti in esame.

La procedura di misura indicata nelle norme considerate (UNI EN ISO 140-1), si basa essenzialmente sull'impiego di un generatore di rumore normalizzato da sistemare sulla struttura in "prova", mentre nella camera sottostante (ricevente) viene collocata una postazione microfonica rotante, per effettuare, come si è già visto, una media spazio-temporale dei livelli sonori ambientali generati. Il generatore di rumore non è in questo caso un insieme di altoparlanti, ma un dispositivo meccanico che solleva una serie di martelletti in acciaio e li lascia cadere per gravità, uno per volta, sulla superficie del pavimento, provocando l'eccitazione

meccanica di tutta la struttura interessata. Le caratteristiche della macchina di calpestio e in particolare: il numero, il peso, le dimensioni, nella norma UNI EN ISO 140-6.

Procedimento predefinito e a bassa frequenza per la misurazione del livello di pressione sonora UNI EN ISO 16283-1 (2014)

La determinazione dell'isolamento acustico per via aerea secondo la presente parte della ISO16283 richiede che si scelga un ambiente come ambiente emittente che contiene l'altoparlante, e che se ne scelga un altro come ambiente ricevente. Le misurazioni che sono richieste includono:

- i livelli di pressione sonora in entrambi gli ambienti con la sorgente funzionante;
- il rumore di fondo nell'ambiente ricevente quando tutte le sorgenti sono disattivate;
- i tempi di riverberazione nell'ambiente ricevente.

Sono descritti due procedimenti di misurazione che devono essere utilizzati per il livello di pressione sonora, il tempo di riverberazione e il rumore di fondo; un procedimento predefinito e un ulteriore procedimento a bassa frequenza.

Per il livello di pressione sonora e il rumore di fondo, il procedimento predefinito per tutte le frequenze è di utilizzare un microfono fisso o un microfono a impugnatura manuale spostato da una posizione a un'altra, una serie di posizioni di microfoni, un microfono a

movimento continuo meccanizzato o un microfono a scansione manuale. Queste misurazioni sono ricavate nella zona centrale di un ambiente in posizioni distanti dalle pareti dell'ambiente. Sono descritti approcci differenti per campionare la pressione sonora in modo che l'operatore possa scegliere l'approccio più idoneo per l'ambiente emittente e l'ambiente ricevente.

La considerazione principale per l'ambiente emittente concerne la protezione acustica da utilizzare da parte dell'operatore umano. Per l'ambiente ricevente l'obiettivo è di minimizzare l'effetto del rumore di fondo per il quale l'operatore deve decidere se è vantaggioso essere presente nell'ambiente per ascoltare il rumore di fondo intermittente o essere fuori dall'ambiente per assicurare che il rumore di fondo sia inalterato dall'operatore.

Per il livello di pressione sonora e il rumore di fondo, il procedimento a bassa frequenza deve essere utilizzato per bande di terzo di ottava di 50Hz, 63Hz e 80Hz nell'ambiente emittente e/o nell'ambiente ricevente quando il loro volume è minore di 25m³. Questo procedimento è eseguito in aggiunta al procedimento predefinito e richiede misurazioni supplementari del livello di pressione sonora negli angoli dell'ambiente emittente e/o ricevente utilizzando un microfono fisso o un microfono ad impugnatura manuale.

Il procedimento a bassa frequenza è necessario nei piccoli ambienti a causa delle grandi variazioni spaziali nel livello di pressione sonora. In queste situazioni, le misurazioni degli angoli sono utilizzate per migliorare la ripetibilità, la riproducibilità e la pertinenza per gli occupanti dell'ambiente.

Se necessaria per evitare danni all'udito, la protezione acustica dovrebbe essere indossata dall'operatore quando misura il livello di pressione sonora nell'ambiente emittente e, se necessario, quando misura i tempi di riverberazione nell'ambiente ricevente. Quando si misurano livelli di pressione sonora nell'ambiente ricevente che non provocano danni all'udito è consigliabile rimuovere qualsiasi protezione acustica in modo che l'operatore sia consapevole dei brevi eventi di rumore esterno che potrebbero invalidare la misurazione oltre che per aiutare l'operatore a minimizzare il rumore auto generato.

Per il tempo di riverberazione, il procedimento a bassa frequenza deve essere utilizzato per bande di terzo di ottava di 50Hz, 63Hz e 80Hz nell'ambiente emittente e nell'ambiente ricevente quando il loro volume è minore di 25m³.

I procedimenti predefiniti e a bassa frequenza consentono di effettuare misurazioni senza alcuna conoscenza della possibile condizione di diffuso o non diffuso del campo sonoro.

Per questa ragione, il campo sonoro non dovrebbe essere modificato ai fini della prova introducendo temporaneamente ulteriori arredi o diffusori in uno o in entrambi gli ambienti (ammobiliati o non ammobiliati).

Tutti i metodi di misurazione per il procedimento predefinito o il procedimento a bassa frequenza sono equivalenti. In caso di controversia, l'isolamento acustico per via aerea determinato utilizzando metodi di misurazione senza un operatore all'interno dell'ambiente emittente e/o ricevente deve essere considerato come risultato di riferimento. Tale risultato di riferimento è definito per due ragioni: In primo luogo, perché un operatore introduce ulteriore assorbimento nell'ambiente emittente che non è presente quando l'operatore effettua misurazioni nell'ambiente ricevente.

Secondariamente, il livello del rumore di fondo con la scansione manuale è soggetto a variazione nel rumore auto generato dall'operatore che non tende a verificarsi con microfoni fissi o un microfono a movimento continuo meccanizzato.

La differenza fondamentale tra le misure in opera e le misure di laboratorio come accennato in precedenza, è l'assenza di controllo sulle camere di misura, nelle quali non è assicurata la minimizzazione della trasmissione laterale (assicurata invece in laboratorio dal disaccoppiamento elastico delle camere).

Misura in opera dell'isolamento del rumore di calpestio secondo la norma UNI EN ISO 140-7

Anche nel caso della misura in opera del livello di rumore di calpestio, le modalità di prova sono assai simili a quelle utilizzate in laboratorio. Si tratta di porre il generatore di rumore di calpestio normalizzato in almeno 4 posizioni, a 45° rispetto all'asse delle travi e a non meno di 0,5 m dal perimetro del pavimento. Nel locale sottostante si rileva il livello di pressione sonora ponendo il microfono in non meno di 4 punti, rispettando, in pratica le stesse prescrizioni richieste dalla misura in laboratorio.

Il calcolo degli indici di valutazione secondo le norme UNI EN ISO 717-1,717-2 e 11654

Tutte le prove finora considerate, esprimono i risultati di misura nel dominio della frequenza. In particolare, la distribuzione spettrale è determinata per bande di frequenza di 1/3 d'ottava o, nel caso delle misure in opera, anche per bande di 1 ottava, in un campo di frequenza che solitamente è compreso tra 100 Hz e 5 kHz.

Questo tipo di analisi corrisponde a quanto prescritto dalla normativa e a quanto solitamente è richiesto dai progettisti e agli utenti dei prodotti. Ma ciò ovviamente non impedisce che in casi particolari, dove per qualsiasi motivo sia necessario un maggior dettaglio analitico, non si possa ricorrere, disponendo

dell'adeguata strumentazione, ad un'analisi più fine, ad esempio effettuando le misure per 1/12 d'ottava.

Una semplificazione da tempo in uso, in questo campo, è la riduzione della curva sperimentale ad un singolo valore, ad un numero che la normativa ISO definisce **indice di valutazione**. Questa semplificazione non va assolutamente considerata come alternativa o sostitutiva rispetto alla classica rappresentazione in funzione della frequenza, ma è da considerarsi come un utile dato complementare da inserire nel rapporto di prova. Il calcolo dell'indice di valutazione è, in una certa misura, un procedimento di tipo convenzionale, nel senso che il risultato può differire sensibilmente a seconda del criterio adottato, criterio che può anche ridursi, nella semplificazione più elementare, alla semplice media aritmetica.

Successivamente nel caso pratico è definito il metodo per il calcolo di tale indice.

Problematiche insite nelle misure

Le misure di acustica in edilizia , e in particolare quelle di potere fonoisolante e di isolamento dal rumore da calpestio, sono affette da una notevole serie di problematiche, relative sia alla metodologia di esecuzione che alla definizione dell'incertezza di misura dei risultati ottenuti.

Nel caso della misura del potere fonoisolante, la questione più importante è, allo stato attuale, quella della riproducibilità, ovvero la confrontabilità, con relativa l'incertezza dei risultati di misure effettuate, secondo la procedura indicata dalla norma, su uno stesso campione in laboratori diversi. Oltre a cause legate proprio alla conformazione del laboratorio in sé, la causa maggiore riguarda le modalità di montaggio dei campioni. È noto, ad esempio, che un montaggio non eseguito a regola d'arte, può determinare dei passaggi diretti di suono, tra la camera trasmittente e quella ricevente, attraverso eventuali fessure che si vengono a creare nelle giunzioni tra pannello e pannello e/o tra pannello e cornice, riducendo notevolmente il potere fonoisolante misurato, soprattutto ad alte frequenze. Gran parte dei laboratori usano, come buona regola, effettuare prima di ogni misura un controllo fonometrico sui bordi della struttura e sugli eventuali giunti, per accertare l'esistenza di eventuali sfuggite sonore imputabili ad un difettoso montaggio del campione.

Lo stesso problema si può riscontrare in opera, dove gli esiti però risultano più gravanti in quanto, uno scorretto montaggio dei materiali potrebbe, oltre a compromettere il risultato richiesto, rappresentare costi aggiuntivi.

6.2.1. Caratteristiche tecniche della strumentazione

La strumentazione si compone essenzialmente di 4 parti. Di fianco a ciascuna di esse viene indicata la normativa tecnica cui la stessa deve sottostare:

A) Fonometro Integratore - EN 60651/1994 ed EN 60804/1994 - Classe 1

B) Calibratore - CEI 29-14, IEC 942/1988 - Classe 1

C) Filtri per analisi in frequenza - EN 61260/1995 (IEC 1260)

D) Eventuale registratore - la sola risposta in frequenza deve essere conforme alla norma EN 60651/1994

Il D.M. 16/3/98, inoltre, consente anche l'impiego di altri elementi (non meglio precisati) posti a completamento della catena di misura, pur non essendo gli stessi previsti nelle norme tecniche citati alle voci A), B) e C) suddette. Tali elementi aggiuntivi, comunque, debbono assicurare il rispetto dei limiti di tolleranza della classe 1. E' opinione comune che fra questi elementi aggiuntivi siano compresi cavi, protezione antivento o parapioggia per il microfono, sistemi di supporto dello stesso. E' invece molto controverso considerare il Personal Computer, che spesso accompagna la restante strumentazione di misura, come parte di questi elementi di completamento.

E' richiesta la verifica periodica di conformità (almeno ogni due anni) di tutta la catena strumentale (non della sola parte

fonometrica). Non tutti i laboratori autorizzati, tuttavia, sono attrezzati in modo da verificare la risposta in frequenza del registratore, la conformità dei filtri per l'analisi in frequenza, né l'effetto delle parti accessorie di cui sopra.

Si prescrive l'utilizzo di un microfono per campo libero, orientato verso la sorgente di rumore, se la stessa è unica e ben identificabile. Viceversa, se la sorgente non è ben definita, si prescrive l'impiego di un microfono per campo diffuso. Bisognerebbe possederli entrambi, e magari sostituirli nel corso dei rilievi.

Il microfono va collocato "su apposito sostegno", collegato al fonometro mediante cavo di lunghezza adeguata, in modo tale da consentire all'operatore di mantenere una distanza di almeno tre metri dal microfono.

All'inizio e alla fine di ogni sessione di misurazione e almeno all'inizio e alla fine di ogni giornata di misurazione, l'intero sistema di misurazione del livello di pressione sonora deve essere controllato su una o più frequenze per mezzo di un calibratore acustico che rispetti i requisiti di uno strumento classe 0 o 1. Ogni volta che si utilizza un taratore, si dovrebbe annotare il livello di pressione sonora misurato con il taratore nella documentazione in campo dell'operatore. Senza alcuna ulteriore regolazione, la differenza tra le letture di due controlli consecutivi deve essere minore o uguale di 0,5 dB. Se si eccede questo limite, si devono scartare i risultati delle misurazioni ottenuti dopo il precedente controllo soddisfacente.

STRUMENTI PER IL RILIEVO :

FONOMETRO



Figura 38 - Foto tipologia di fonometro



Figura 39 – Foto di movimentazione manuale del fonometro

GENERATORE E CASSA MONODIREZIONALE



Figura 40 - Generatore a cassa monodirezionale



Figura 41 – Installazione di un generatore a cassa monodirezionale



Figura 42 - Generatore a dodecaedro



Figura 43 – Supporto di amplificazione (foto del rilievo svolto)



Figura 44 - software e supporto di ricezione dati



Figura 45 - software di ricezione dati e prima elaborazione utilizzato nel rilievo svolto

SORGENTI DA RUMORE DI CALPESTIO



Figura 46 - Generatore di rumore da calpestio

6.3. Prove acustiche rumori aerei

In questa sezione verrà descritta l'attività di rilievo acustico condotta negli spazi interessati dall'intervento, per quanto riguarda i rumori aerei.

I rumori aerei sono quelle perturbazioni irregolari con caratteristiche tonali non ben definite, che derivano da una sorgente, la quale irradia la sua energia nell'aria circostante. Tali rumori possono essere esterni (traffico stradale, ferroviario, aereo, ecc.) oppure interni (conversazioni, canali hi-fi, televisori, ecc.).

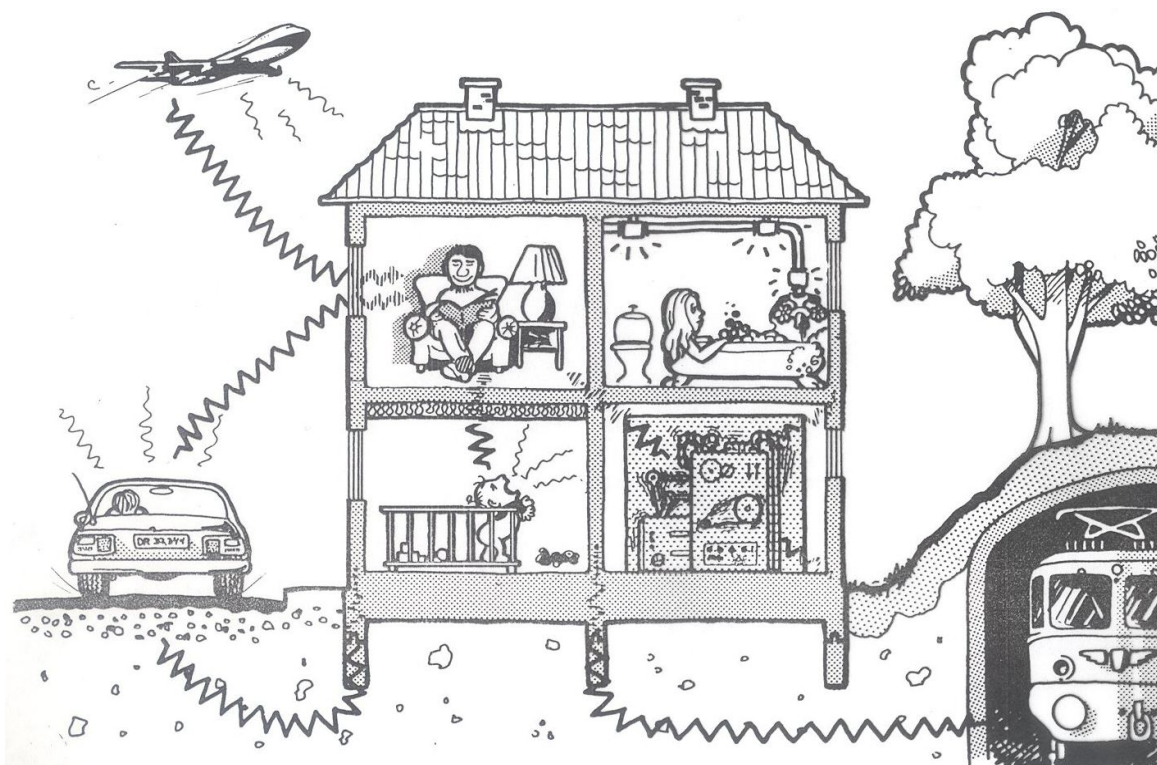


Figura 47 - immagine rappresentativa di varie sorgenti di inquinamento acustico

6.3.1. Descrizione prova

Le prove acustiche, sono state condotte in seguito al trasloco delle attuali utenze e di tutti gli elementi di arredo, per quanto riguarda il locali soggetti all'intervento di riqualificazione. Figura 42.

Per quanto riguarda invece i locali non soggetti all'intervento, (figura 43), non si è potuto intervenire in ugual modo e quindi il rilievo è stato comunque svolto, tenendo conto di tale aspetto nel caso di prove acustiche di verifica a lavori ultimati.



Figura 48 - Foto da rilievo acustico svolto: locali svuotati da utenze e arredi



Figura 49 - Foto da rilievo acustico svolto: locali occupati da utenze e arredi

Il procedimento di misura in opera delle prestazioni di isolamento ai rumori aerei delle partizioni che separano ambienti messo in atto è, come visto in precedenza, descritto nelle norme tecniche EN ISO 16283-1:2014.

La determinazione dell'isolamento acustico per via aerea, quindi, necessita in principio, di selezionare gli ambienti, emittente e ricevente. Le misurazioni che sono richieste includono i livelli di pressione sonora in entrambi gli ambienti con:

- la sorgente funzionante;
- il rumore di fondo nell'ambiente ricevente quando tutte le sorgenti sono disattivate;
- i tempi di riverberazione nell'ambiente ricevente.

LOCALI INTERESSATI DAL RILIEVO ACUSTICO

La 1° fase del rilievo acustico riguarda la zona dell'edificio che nelle piante seguenti è contrassegnata da una cornice rossa.

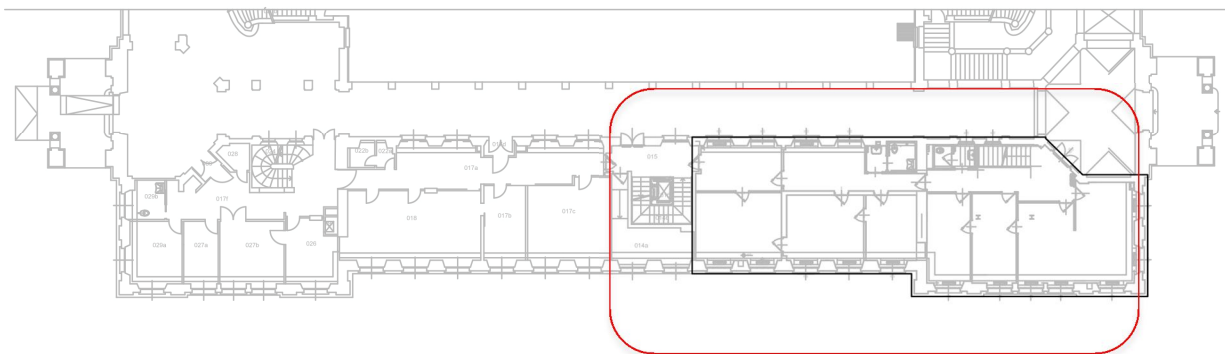


Figura 50 - Ritaglio Pianta Piano Terra edificio 2 con segnalazione della zona interessata dal rilievo

L'area nascosta dal layer grigio rappresenta i locali del Piano Soppalco non soggetti all'intervento che necessita il rilievo acustico, quindi non considerati in tale rilievo.

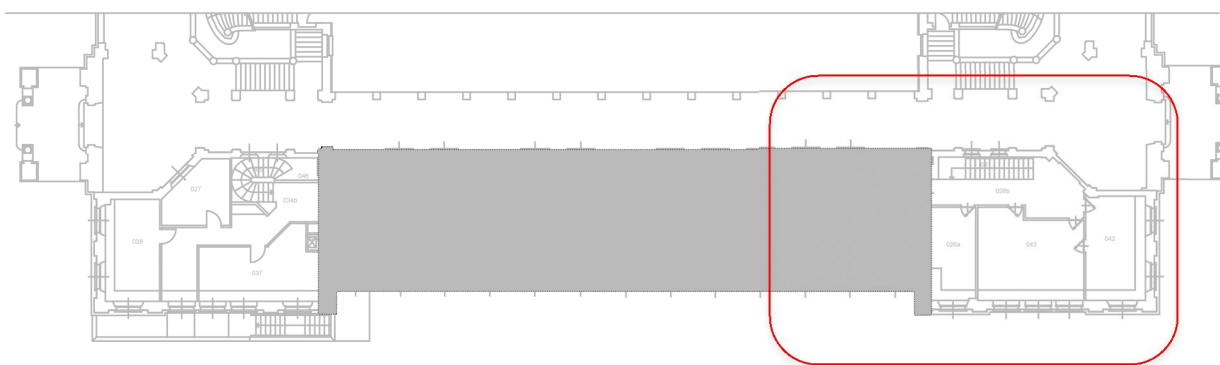


Figura 51 - Ritaglio Pianta Piano Soppalco edificio 2 con segnalazione della zona interessata dal rilievo

Nei riquadri seguenti, che contengono gli ingrandimenti della zona interessata, l'area segnalata dal bollino blu identifica il locale di riferimento nel quale è stato installato l'emettitore ed il fonometro in fase preliminare di rilievo.

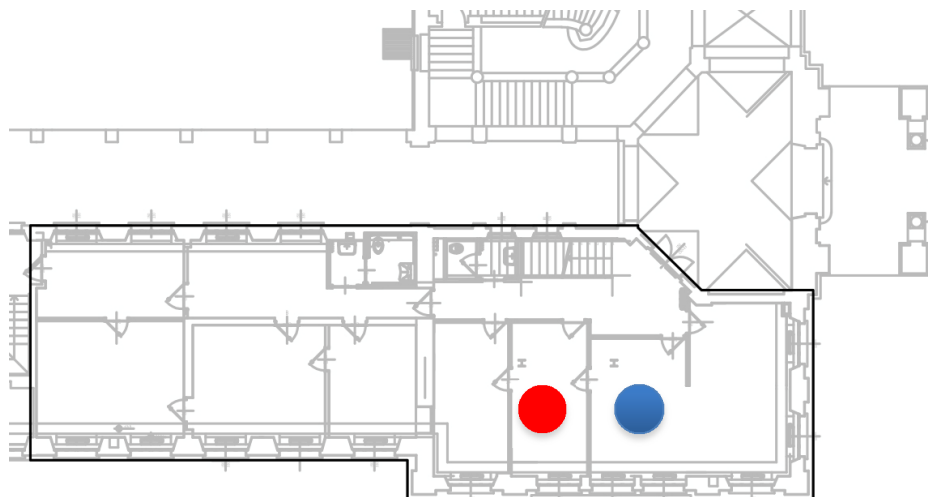


Figura 52 - Ingrandimento della zona interessata Pianta Piano Terra

Successivamente, il fonometro è stato posizionato nel locale adiacente (bollino rosso), e nel locale soprastante, in corrispondenza di quello iniziale (bollino verde nella figura 47).

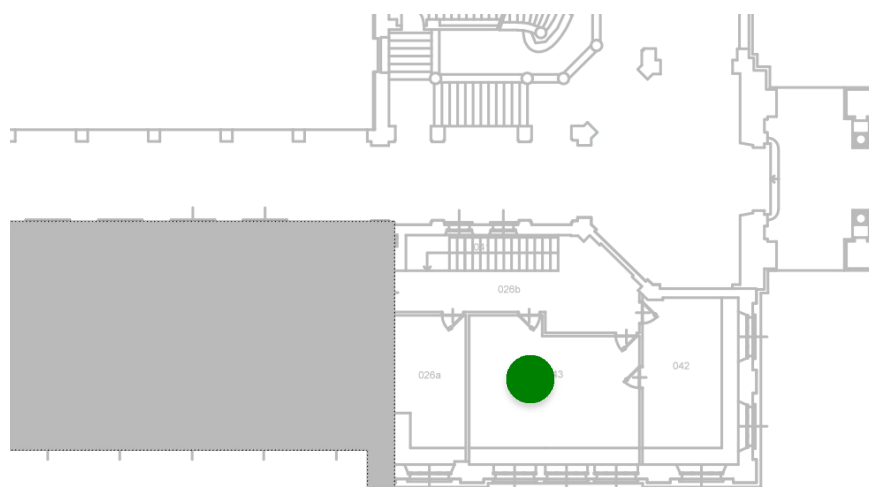


Figura 53 – Ingrandimento zona interessata Pianta Piano Soppalco

La 2° fase del rilievo acustico riguarda la zona dell'edificio che nelle piante seguenti è contrassegnata da una cornice rossa.

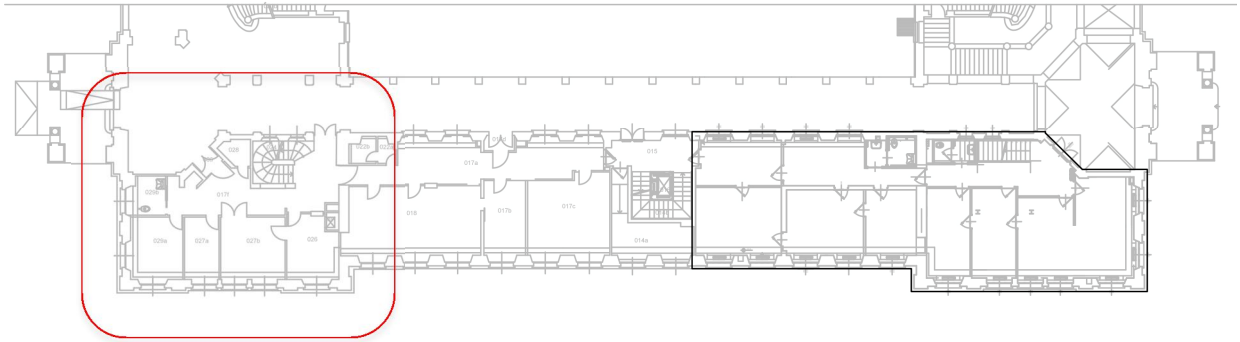


Figura 54 - Ritaglio Pianta Piano Terra edificio 2 con segnalazione della zona interessata dal rilievo

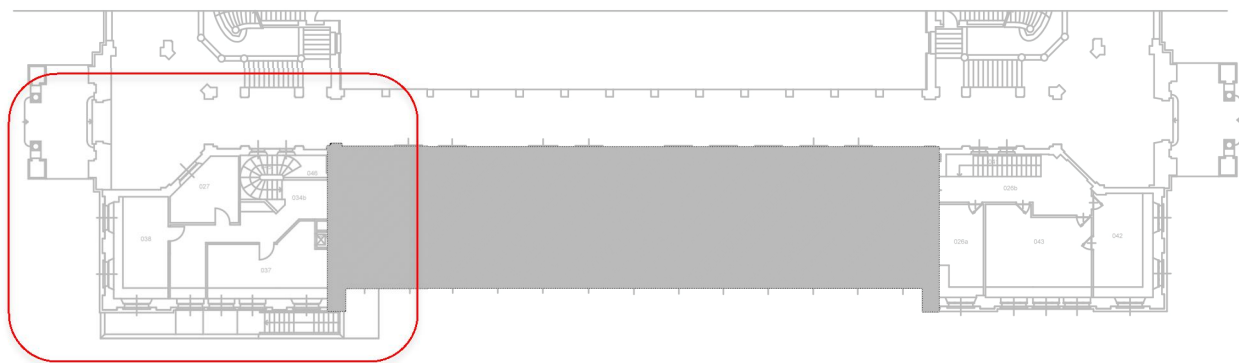


Figura 55 - Ritaglio Pianta Piano Soppalco edificio 2 con segnalazione della zona interessata dal rilievo

Nei riquadri seguenti, che contengono gli ingrandimenti della zona interessata, l'area segnalata dal bollino blu identifica il locale di riferimento nel quale è stato installato l'emittente ed il fonometro in fase preliminare di rilievo.

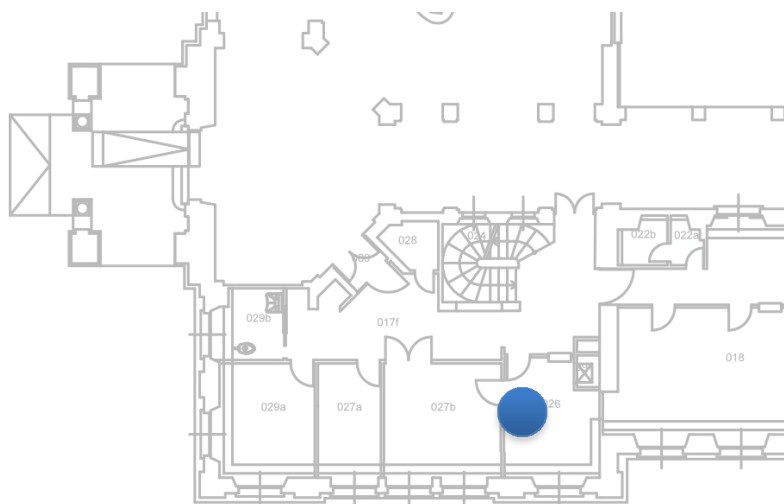


Figura 56 - Ingrandimento zona interessata Pianta Piano Terra

Successivamente, il fonometro è stato posizionato nel locale soprastante in corrispondenza di quello iniziale (bollino verde nella pianta seguente).

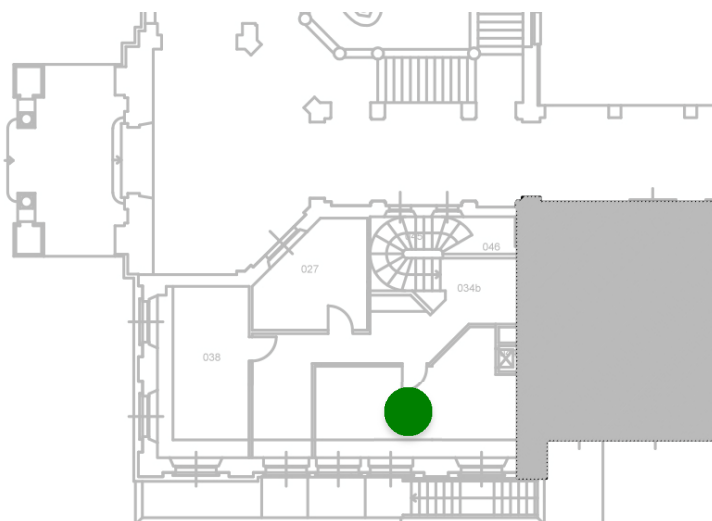


Figura 57 - Ingrandimento zona interessata Pianta Piano Soppalco

L'esecuzione di due fasi di rilievo in due zone opposte dell'edificio, si è resa necessaria poiché le due parti presentano soluzioni tecnologiche e datazioni differenti, manifestando quindi performance acustiche diverse.



Figura 58 - Foto da rilievo svolto: operatore con fonometro pronto al rilievo a scansione manuale

Nella normativa tecnica, sono descritti approcci differenti per campionare la pressione sonora in modo che l'operatore possa scegliere l'approccio più idoneo per l'ambiente emittente e l'ambiente ricevente.

Per l'ambiente ricevente l'obiettivo è di minimizzare l'effetto del rumore di fondo per il quale l'operatore deve decidere se è vantaggioso essere presente nell'ambiente per ascoltare il rumore di fondo intermittente (figura 52), o essere fuori dall'ambiente per assicurare che il rumore di fondo sia inalterato dall'operatore.

Se necessaria per evitare danni all'udito, la protezione acustica dovrebbe essere indossata dall'operatore quando misura il livello di pressione sonora nell'ambiente emittente e, se



nessario, quando misura i tempi di riverberazione nell'ambiente ricevente.

Quando si misurano livelli di pressione sonora nell'ambiente ricevente che non provocano danni all'udito è consigliabile rimuovere qualsiasi protezione acustica in modo che l'operatore sia consapevole dei brevi eventi di rumore esterno che potrebbero invalidare la misurazione oltre che per aiutare l'operatore a minimizzare il rumore auto generato.

Per il tempo di riverberazione, il procedimento a bassa frequenza deve essere utilizzato per bande di terzo di ottava di 50Hz, 63Hz e 80Hz nell'ambiente emittente e/o nell'ambiente ricevente quando il loro volume è minore di 25m³ (calcolato al più prossimo metro cubo). Per la misura del tempo di riverberazione nell'ambiente ricevente, sono stati misurati tre decadimenti emessi attraverso l'esplosione di palloncini. La scelta nell'utilizzo di palloncini a sostituzione del dodecaedro è stata fatta per cercare di eliminare l'effetto di disturbo nella rilevazione sonora dovuta alla strumentazione elettronica emittente.



Figura 59 - Foto del rilievo svolto, operatore pronto al rilievo del tempo di riverbero

I campi sonori negli ambienti tipici (ammobiliati o non ammobiliati) si approssimano raramente a un campo sonoro diffuso sull'intero campo di frequenze da 50Hz a 5 000Hz.

Nello specifico, il processo di rilievo svolto è consistito nel:

- Rilevare il livello di rumore di fondo nell'ambiente ricevente;
- Attivare una sorgente di rumore nell'ambiente emittente;
- Rilevare i livelli di rumore in più punti dell'ambiente emittente (L1);
- Rilevare i livelli di rumore in più punti dell'ambiente ricevente (L2);

- Rilevare in più punti il tempo di riverbero nell'ambiente ricevente T
- Rilevare le caratteristiche geometriche degli ambienti.



Figura 60 - Foto da rilievo svolto: Strumentazione in posizione

Le norme tecniche hanno fornito indicazioni in merito alle posizioni della sorgente di rumore e dei punti di rilievo ed alle caratteristiche degli strumenti di misura e della sorgente sonora. In particolare il suono generato nell'ambiente emittente deve essere costante ed avere uno spettro continuo nella gamma di frequenza considerata. A tale scopo è stata utilizzata una sorgente di rumore bianco o rosa ed è stata posizionata in modo tale da generare un suono che sia il più diffuso possibile.

Le differenti posizioni degli altoparlanti non devono essere collocate entro piani paralleli alle pareti dell'ambiente distanti meno di 0,7 m. La distanza tra le diverse posizioni non deve essere minore di 0,7 m. Almeno due posizioni devono essere a una distanza non minore di 1,4 m.

Quando si misura l'isolamento acustico per via aerea di un pavimento con lo(gli) altoparlante(i) nell'ambiente superiore, la base dello(degli) altoparlante(i) deve essere di almeno 1,0 m sopra il livello del pavimento.

Quando si utilizza un singolo altoparlante, come nel nostro caso, si deve eseguire un minimo di una misurazione utilizzando un microfono a movimento continuo per ciascuna posizione dell'altoparlante. La posizione del punto fisso attorno al quale si sposta il microfono a movimento continuo può essere modificata per ciascuna posizione dell'altoparlante.



Figura 61 - Foto del rilievo svolto, percorso a scansione manuale svolto dall'operatore

Il percorso di scansione manuale deve essere un cerchio, una spirale, un percorso di tipo cilindrico o tre semicerchi.

Un percorso a cerchio, a spirale o di tipo cilindrico deve essere utilizzato negli ambienti non ammobiliati o ammobiliati. Se nell'ambiente c'è uno spazio insufficiente per consentire all'operatore di utilizzare questi percorsi, si deve procedere con un percorso costituito da tre semicerchi.

Il tipo di percorso di scansione manuale può essere differente nell'ambiente emittente e in quello ricevente.

Il percorso di scansione manuale interessato dal nostro rilievo è quello dei tre semicerchi.

L'operatore deve stare in piedi impugnando il microfono o il misuratore di livello sonoro con il braccio disteso e tracciare tre semicerchi con separazioni da 45° a 60° circa. Il piano di ciascun semicerchio non si deve trovare in alcun piano che sia a meno di 10° da qualsiasi superficie dell'ambiente (parete, pavimento o soffitto). Se richiesto, le ginocchia possono essere piegate per ridurre l'altezza complessiva del microfono; questo dovrebbe essere effettuato quando il percorso è ripetuto in un'altra posizione dell'ambiente.

Per ciascuno dei tre semicerchi l'operatore deve puntare a ottenere una velocità angolare costante. La massima velocità angolare deve essere approssimativamente di 20° al secondo.

Come introdotto in precedenza, la misura del livello di rumore di fondo, prima di attivare la sorgente, ha lo scopo di verificare che le misure non siano falsate da rumori già presenti nell'ambiente. In particolare è preferibile che la sorgente di rumori generi nella stanza ricevente, livelli di pressione sonora superiori di almeno 10 dB rispetto al rumore di fondo in qualsiasi banda di frequenza. Nel caso non fosse ottenibile ciò, dovranno essere applicate opportune correzioni.

Le misure vengono realizzate considerando almeno le bande di frequenza comprese tra 100 Hz e 3150 Hz. Dai rilievi eseguiti in più punti si ricavano i "valori medi" di L1, L2, T alle varie bande di frequenza. "L medio" si ricava mediante la relazione:

$$L_2 = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \right)$$

La normativa impone che se la differenza tra il livello di pressione sonora misurato e il rumore di fondo è minore di 10 dB ma maggiore di 6 dB, si deve calcolare la correzione del livello nel segnale attraverso l'equazione:

$$L = 10 \lg (10^{L_{sb}/10} - 10^{L_b/10})$$

Dove:

- L è il livello corretto del segnale, in decibel;
- Lsb è il livello combinato del segnale e del rumore di fondo, in decibel;
- Lb è il livello di rumore di fondo, in decibel.

Se invece la differenza è minore o uguale a 6 dB, si deve utilizzare una correzione pari a 1,3. Le correzioni, rispetto al valore misurato, sono sempre in detrazione.

6.3.2. Risultati riscontrati

A questo punto delle nostre operazioni siamo stati in grado di calcolare il potere fonoisolante apparente del divisorio tra i due locali Emittente e Ricevente. Come si può notare nella tabella che segue, il Potere fonoisolante può variare molto in funzione della frequenza del suono.

Il legislatore ha voluto, per semplificare, evitare di fermarsi a calcolare il Potere Fonoisolante apparente per frequenza, ha invece scelto di individuarlo con un singolo numero, detto indice di valutazione, precedentemente introdotto. Le norme ci dicono come dal Potere Fonoisolante apparente misurato in frequenza, si possa passare all'indice, cioè alla determinazione di un unico valore rappresentativo di tutta la partizione.

È importante sottolineare che l'impiego degli indici di valutazione comporta una perdita di informazioni riguardo l'andamento di frequenza della grandezza considerata. Per limitare questa problematica sono stati introdotti alcuni coefficienti (termini di adattamento spettrale), ricavabili dall'andamento in frequenza della prestazione in esame, che consentono di ottenere informazioni aggiuntive al solo indice di valutazione. (i metodi per calcolare questi coefficienti sono descritti nelle norme UNI EN ISO 717 – 1 e 2).

RISULTATO 1°FASE TRA LOCALI ADIACENTI

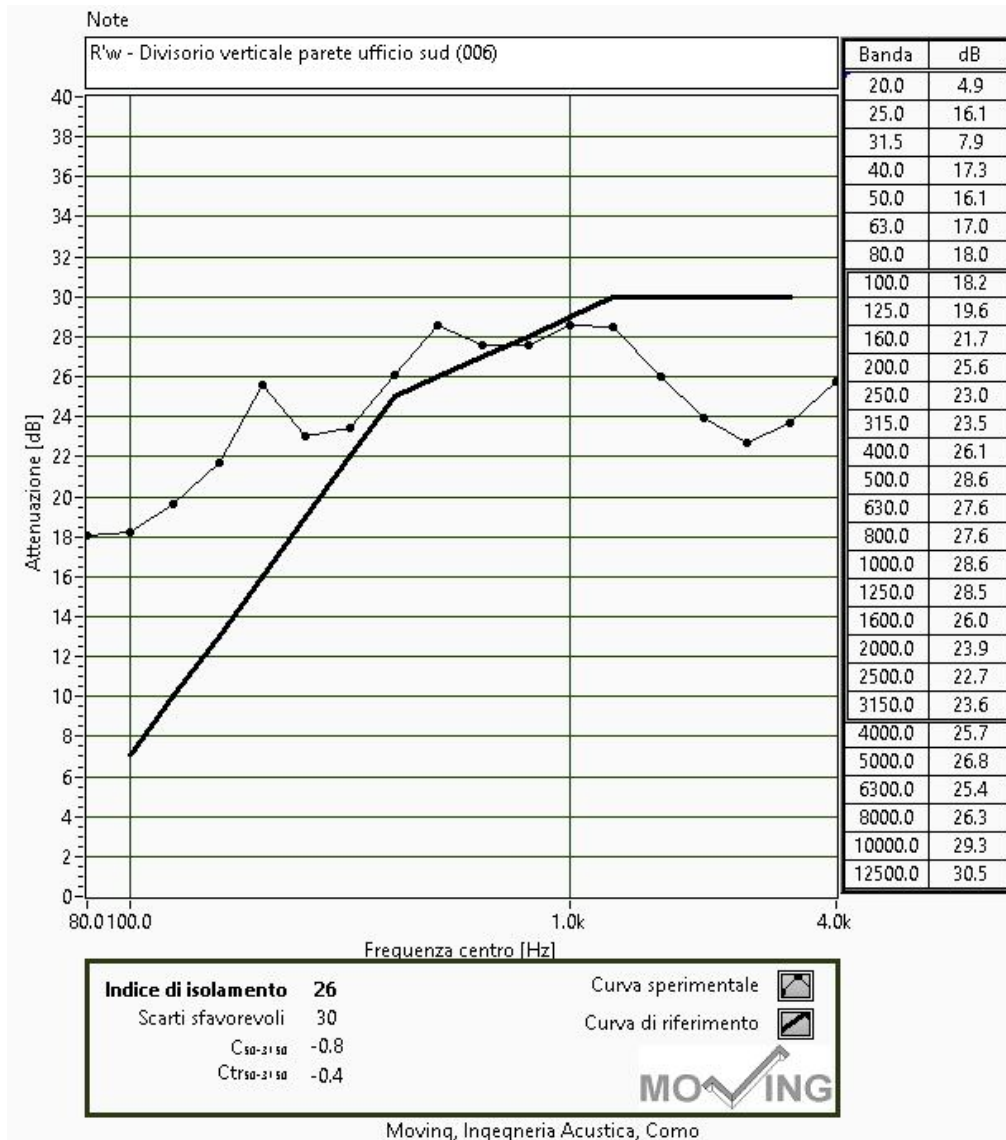


Grafico 2 - Risultati del rilievo nella prima fase (tra locali adiacenti)

RISULTATO 1°FASE TRA PIANO SOPPALCO E PIANO TERRA

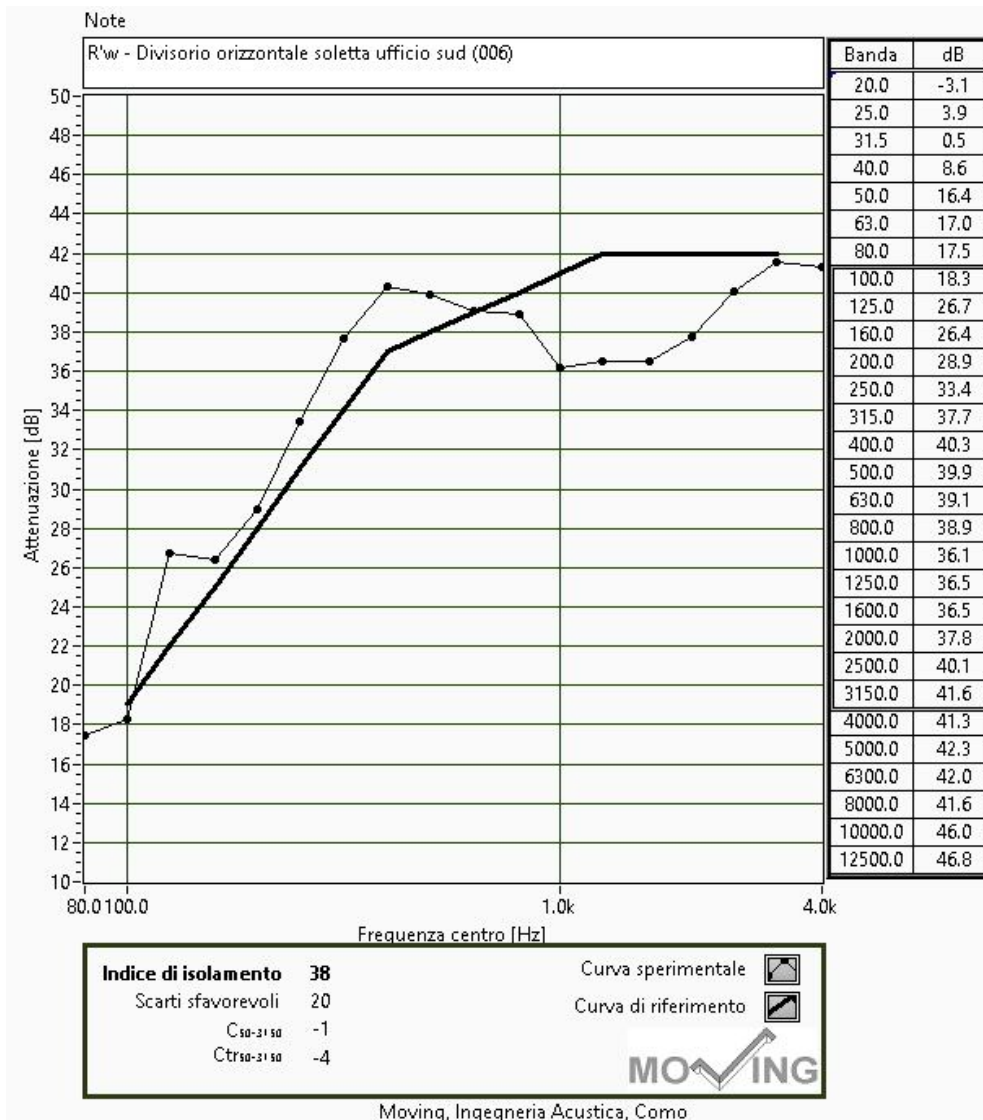


Grafico 3 - Risultati del rilievo nella prima fase (Piano Terra e Piano Soppalco)

RISULTATO 2°FASE TRA PIANO SOPPALCO E PIANO TERRA

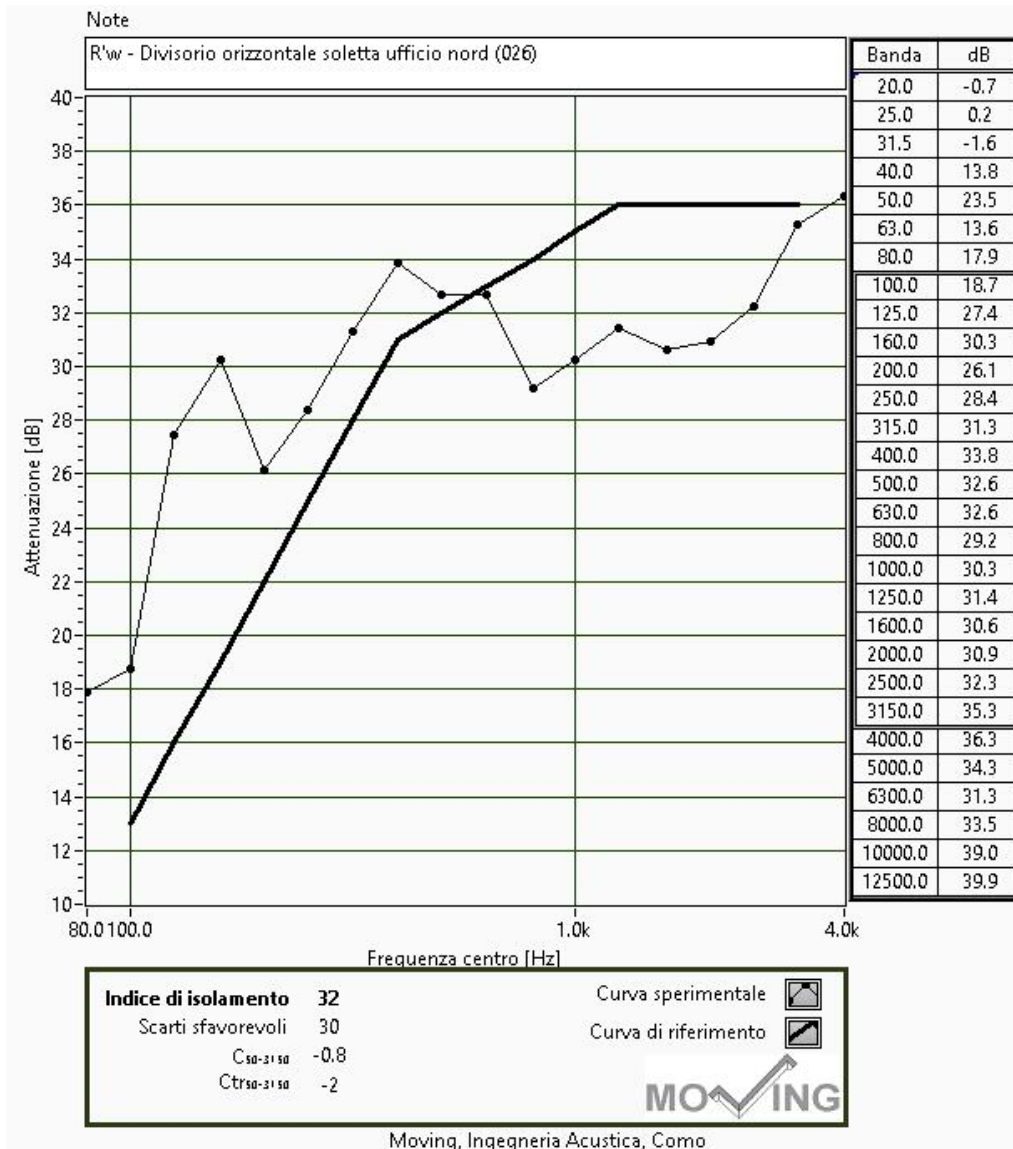


Grafico 4 - Risultati del rilievo nella seconda fase (Piano soppalco e Piano terra)

6.3.3. Prove acustiche rumori da calpestio

Le prove acustiche per i rumori da calpestio, ed il conseguente rilievo dell'isolamento acustico dei solai, non sono state eseguite in quanto dalle indagini svolte non sono scaturite carenze a livello di isolamento acustico da calpestio. Inoltre, la restrizione dei tempi di consegna dei locali, ha motivato ulteriormente la scelta, da parte della direzione lavori, di sorvolare su tale aspetto, considerandolo non critico.

7. Progettazione acustica

7.1. Obiettivi della progettazione

Dopo aver svolto le prove acustiche ed aver accertato lo stato di fatto occorre procedere alla scelta dei materiali e delle tecnologie da impiegare per la ristrutturazione. L'obbiettivo principale resta ovviamente l'isolamento acustico delle chiusure e quindi tutte le scelte di seguito presentate sono volte alla riduzione del ponte acustico esistente. Per la definizione delle soluzioni tecniche siamo stati consigliati ed accompagnati dall'ing. Marcello Brugola quale esperto di acustica in edilizia. Nei paragrafi seguenti saranno presentate le tre diverse tecnologie studiate con l'ing. Brugola.

7.2. Soluzione 1A e 1B

Come introdotto in precedenza, l'ala soggetta all'intervento di riqualificazione del padiglione Nord (ala rivolta verso il piazza Leonardo Da Vinci), presenta differenti finiture dovute ad interventi di riqualificazione avvenuti in due periodi diversi.

Intervento di sistemazione avvenuto negli anni 90

Intervento di sistemazione avvenuto nel 2004

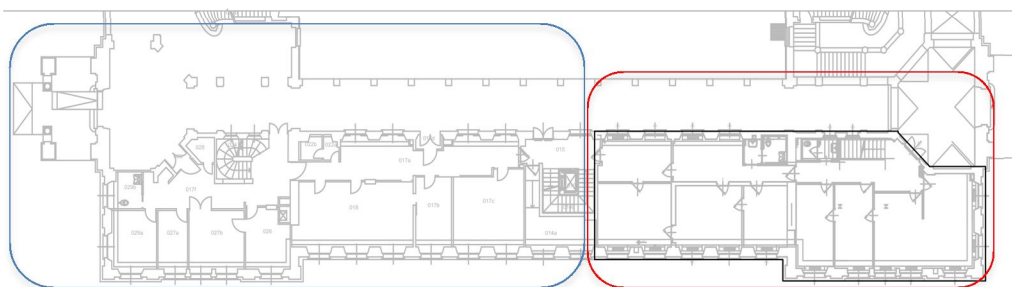


Figura 62 - Pianta Piano Terra con indicazione dei due interventi

In fase di ispezione si è individuato che la causa del ponte acustico tra il piano terra ed il piano soppalco è legata alla partizione orizzontale che si sviluppa perimetralmente tra il solaio ed il serramento, si è voluto procedere quindi con una prima fase di analisi dello stato di fatto.

Le lacune osservate nello stato di fatto delle finitura sono:

- Materiali differenti da quelli indicati nel progetto esecutivo: i materiali stabiliti nel progetto esecutivo redatto nel 2004 non sono stati rispettati in fase di posa in opera.

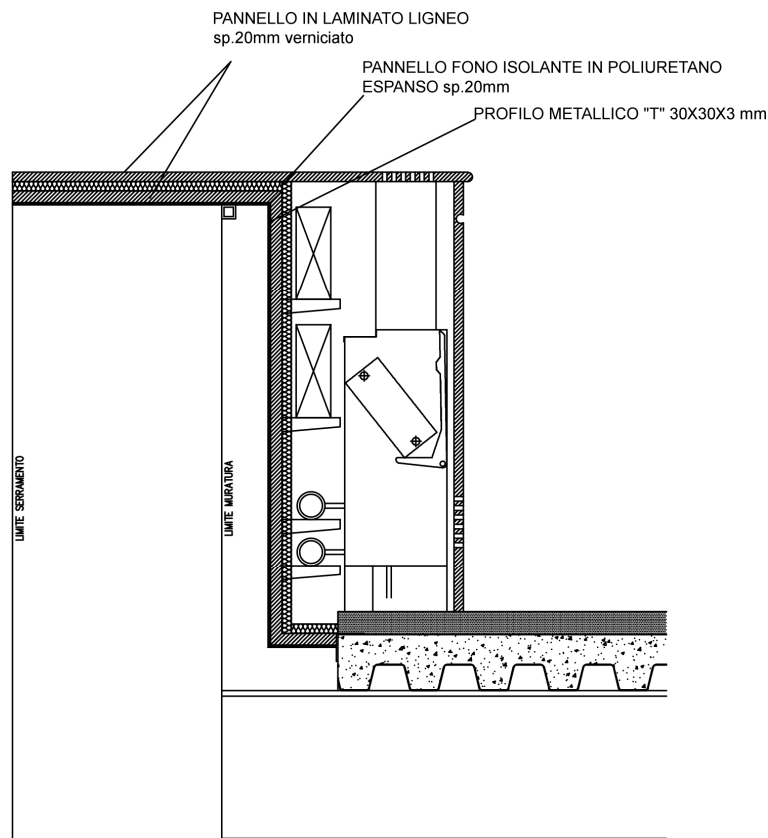


Figura 63 - Particolare esecutivo presente nel Progetto del 2004

Il pannello fonoisolante in poliuretano espanso, infatti, non è presente in nessuna partizione. Inoltre, il pannello in laminato ligneo previsto all'estradosso, è stato sostituito da un pannello in truciolato mono strato;

- Scarsa precisione nella posa in opera della soluzione tecnica:
Smontando il pannello che copre il fancoil incassato nella struttura, si sono potute notare numerose fessure tra le giunture dei pannelli verticali retrostanti la macchina. Tali imprecisioni creano un passaggio d'aria diretto con il piano inferiore con la conseguenza di trasformare tale vano in una “cassa acustica” a tutti gli effetti.



Figura 64 - Foto dell'impianto incassato nella soluzione interessata (Piano Soppalco)

- Collegamento della soluzione tecnica con il telaio dell'infisso:
una delle differenze riscontrabili tra le soluzioni poste nella parte sud e nella parte nord sta nell'altezza della partizione orizzontale costruita tra il solaio ed il serramento.



Figura 65 - Foto dal Piano Terra della soluzione interessata

Nella prima, il serramento è diviso in corrispondenza dell'apertura della mezzaluna mobile con un semplice pannello in truciolato

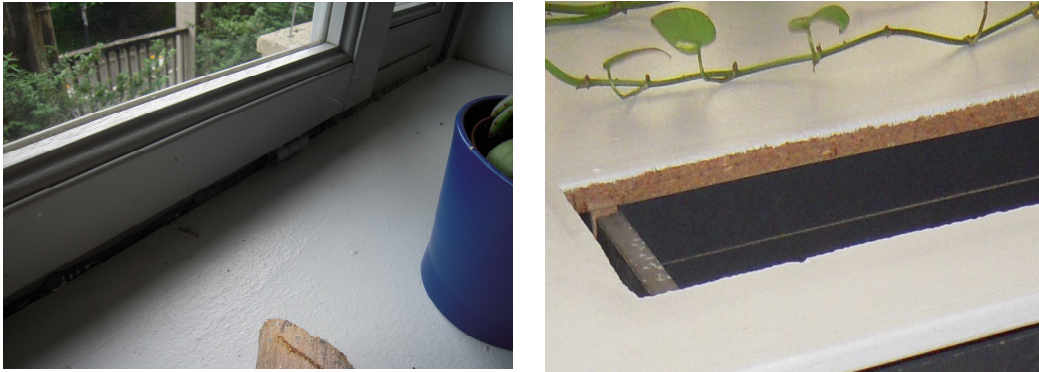


Figura 66 - Foto della battuta della soluzione sull'infisso(a sinistra) ; foto del materiale effettivamente presente nella parte superiore dell'infisso (a destra)

Mentre nella seconda, il serramento è suddiviso appena sopra l'apertura delle ante verticali da una lamiera metallica rivestita con un pannello multistrato di 4 cm.



Figura 67 - Foto della soluzione nella parte nord con diverso materiale (in basso a destra)

Stato di fatto successivo alla prima sistemazione (anni 90, a Nord)

Riferimento A.

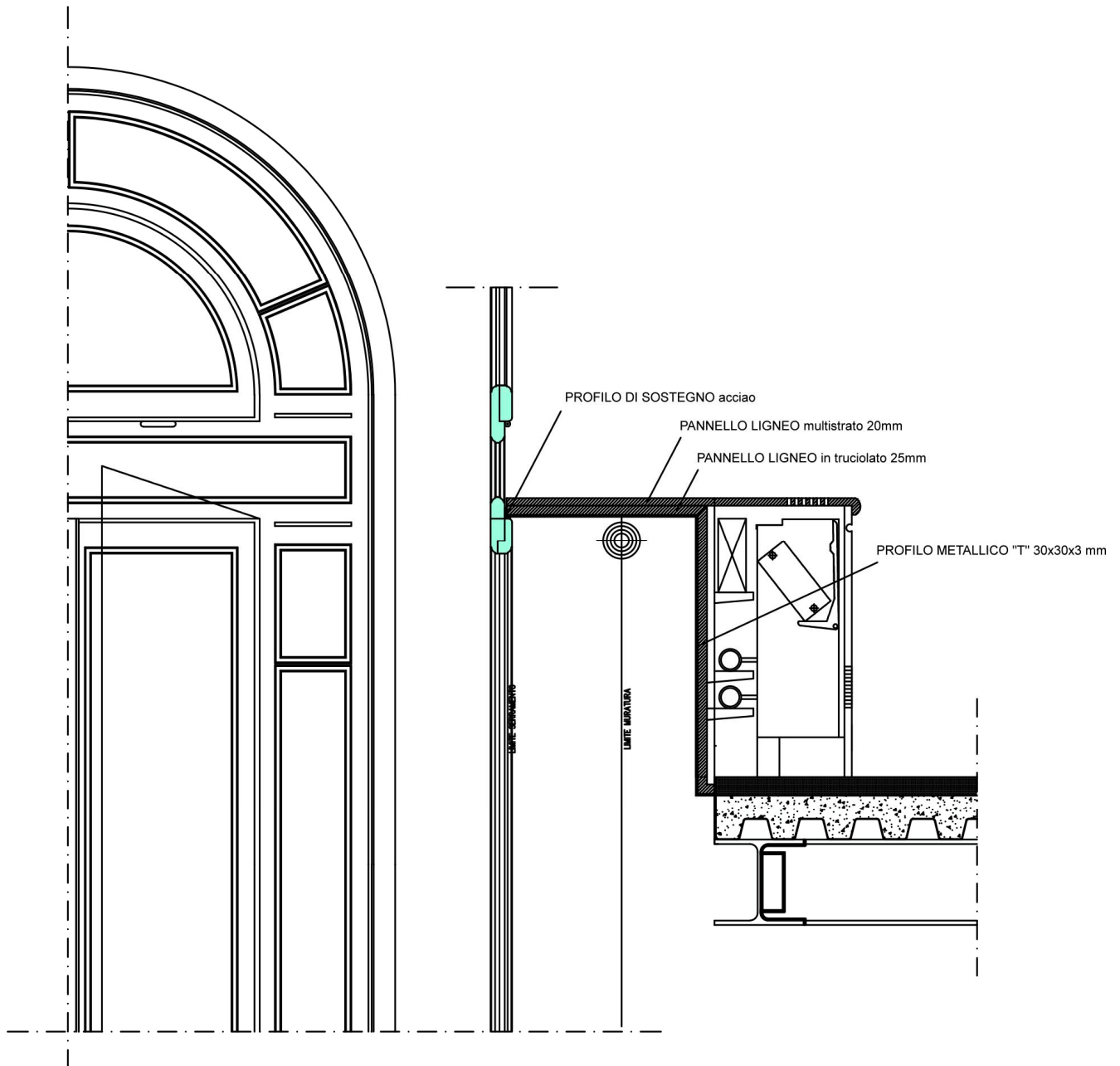


Figura 68 - Disegno dello stato di fatto successivo alla prima sistemazione (parte a nord)

Stato di fatto Successivo alla seconda sistemazione (2004, a Sud)

Riferimento B.

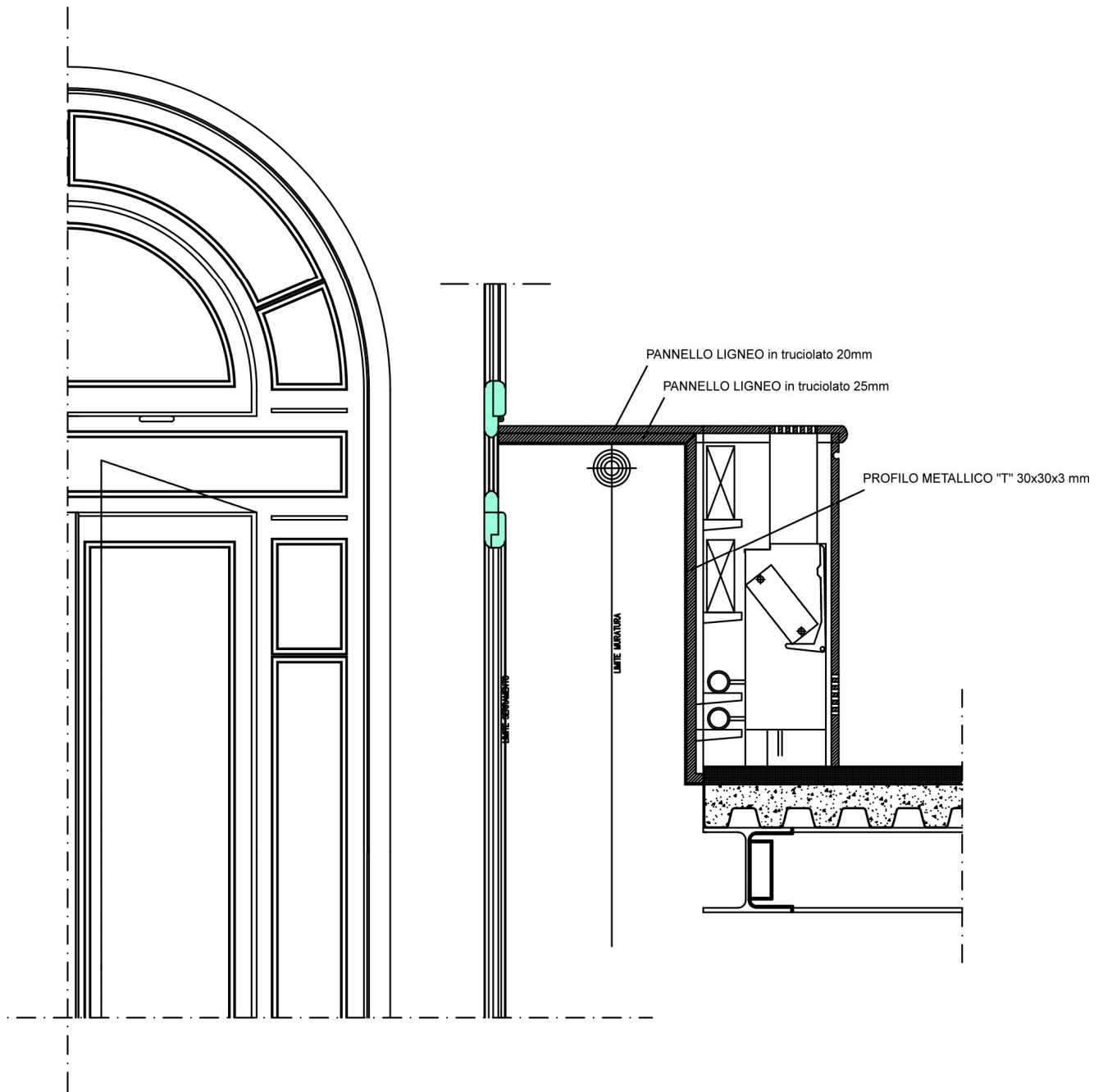


Figura 69 - Disegno dello stato di fatto successivo alla seconda sistemazione (parte a sud)

Progetto Soluzione 1-A

La prima soluzione, riguardante i locali a Nord è anche la meno invasiva e prevede il mantenimento delle finiture esistenti.

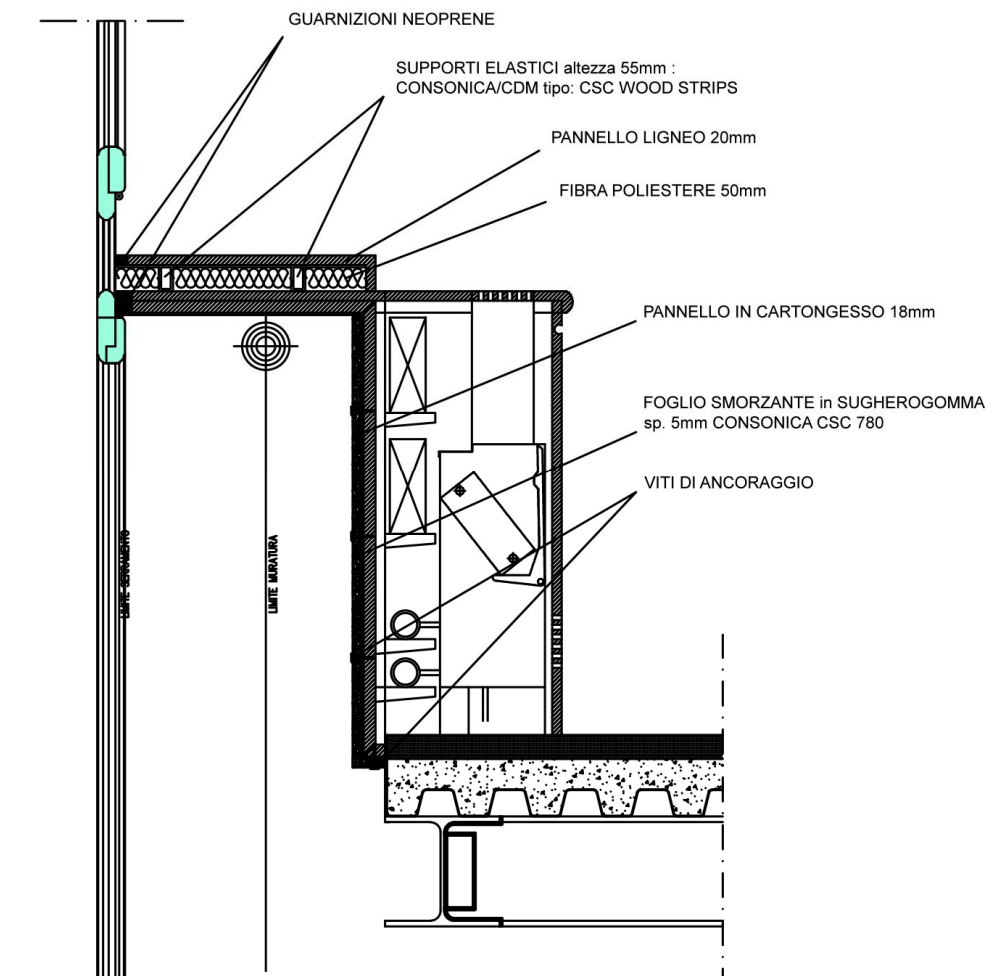


Figura 70 - Estratto dal progetto della soluzione 1-A

Come si evince dal disegno tecnico sopra riportato l'intervento prevede solo l'aggiunta di elementi nuovi mantenendo così le attuali finiture. Per quanto concerne il pannello verticale:

- Sigillatura di eventuali fessure con silicone;
- Applicazione di un foglio smorzante in gomma/sughero all'intradosso;
- Posizionamento di un doppio pannello in cartongesso all'intradosso.

Per quanto riguarda invece la parte orizzontale della partizione:

- Applicazione di guarnizioni in neoprene in prossimità dell'infisso;
- Posizionamento della fibra di poliestere all'estradosso, intervallata da appositi supporti elastici;
- Rivestimento con pannello ligneo.

La soluzione così costituita offre buona tenuta all'aria e non impedisce l'apertura dell'infisso sia al piano terra che al piano soppalco.

Progetto Soluzione 1-B

La soluzione che interessa i locali più a Sud, mira anch'essa al mantenimento della finitura esistente, per motivi legati principalmente a fattori economici ed a tempistiche di intervento.

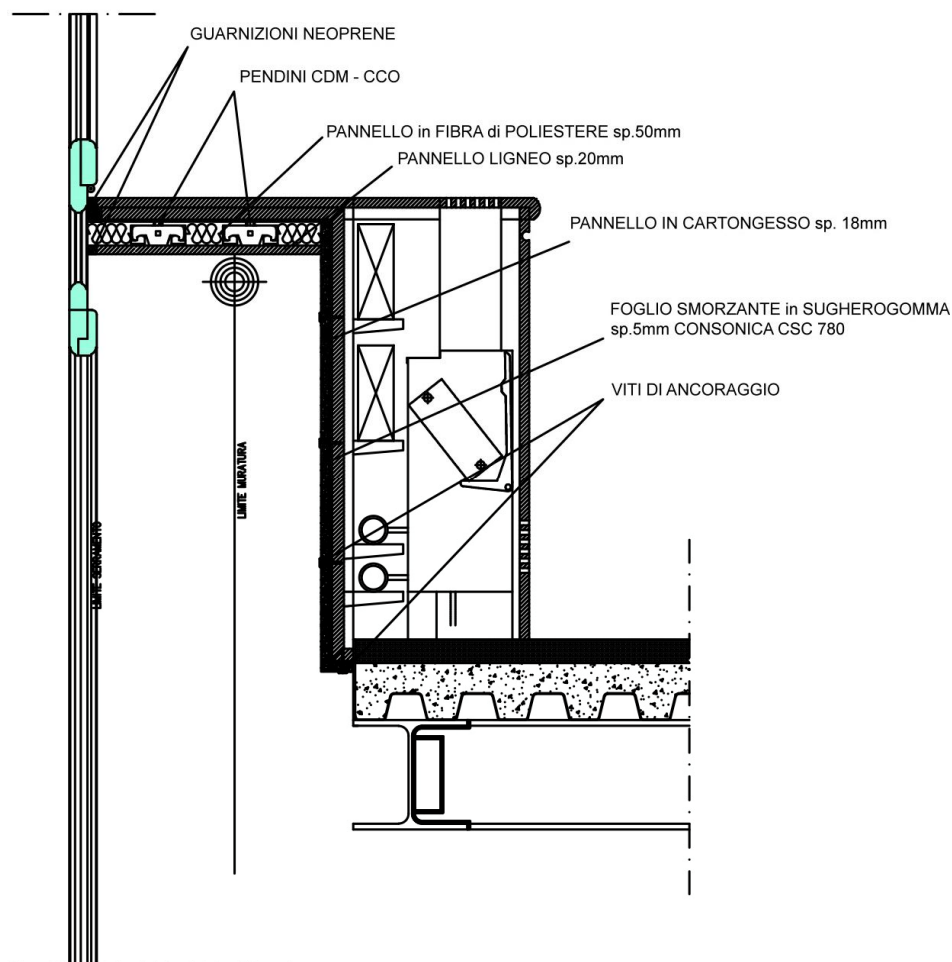


Figura 1-2 Estratto dal progetto della soluzione 1-B

Gli interventi previsti per la parete verticale all'intradosso della struttura sono i medesimi studiati per la soluzione 1-A. Le differenze si notano sulla parte orizzontale, dove il pannello non viene più realizzato all'estradosso del piano esistente, ma all'intradosso, intervenendo dal piano inferiore.

L'intervento prevede:

- Applicazione delle guarnizioni in neoprene in battuta sull'infisso;
- Posizionamento della fibra di poliestere intervallata dai supporti;
- Chiusura con pannello ligneo.

Anche in questa soluzione, come nella precedente, non viene ostruita la meccanica dell'infisso, e viene data molta importanza all'ermeticità della chiusura, sigillando eventuali fessure con del silicone.

7.3. Soluzione 2

La seconda soluzione da noi pensata prevede l'omogeneizzazione delle finiture tra le due parti dell'edificio. Tecnicamente la soluzione è molto simile alle prima due, ma questa prevede la rimozione dei pannelli di finitura esistenti per posarne di nuovi in materiale più adatto, così da eguagliare le due parti e consentendo soprattutto una migliore risposta al ponte acustico. Considerato che, per contrastare il passaggio del suono occorre una precisione millimetrica nelle sigillature e nell'accoppiamento dei materiali, il poter agire su dei pannelli di materiale uniforme consente di eliminare quasi totalmente i punti di discontinuità ottenendo così il massimo delle prestazioni.

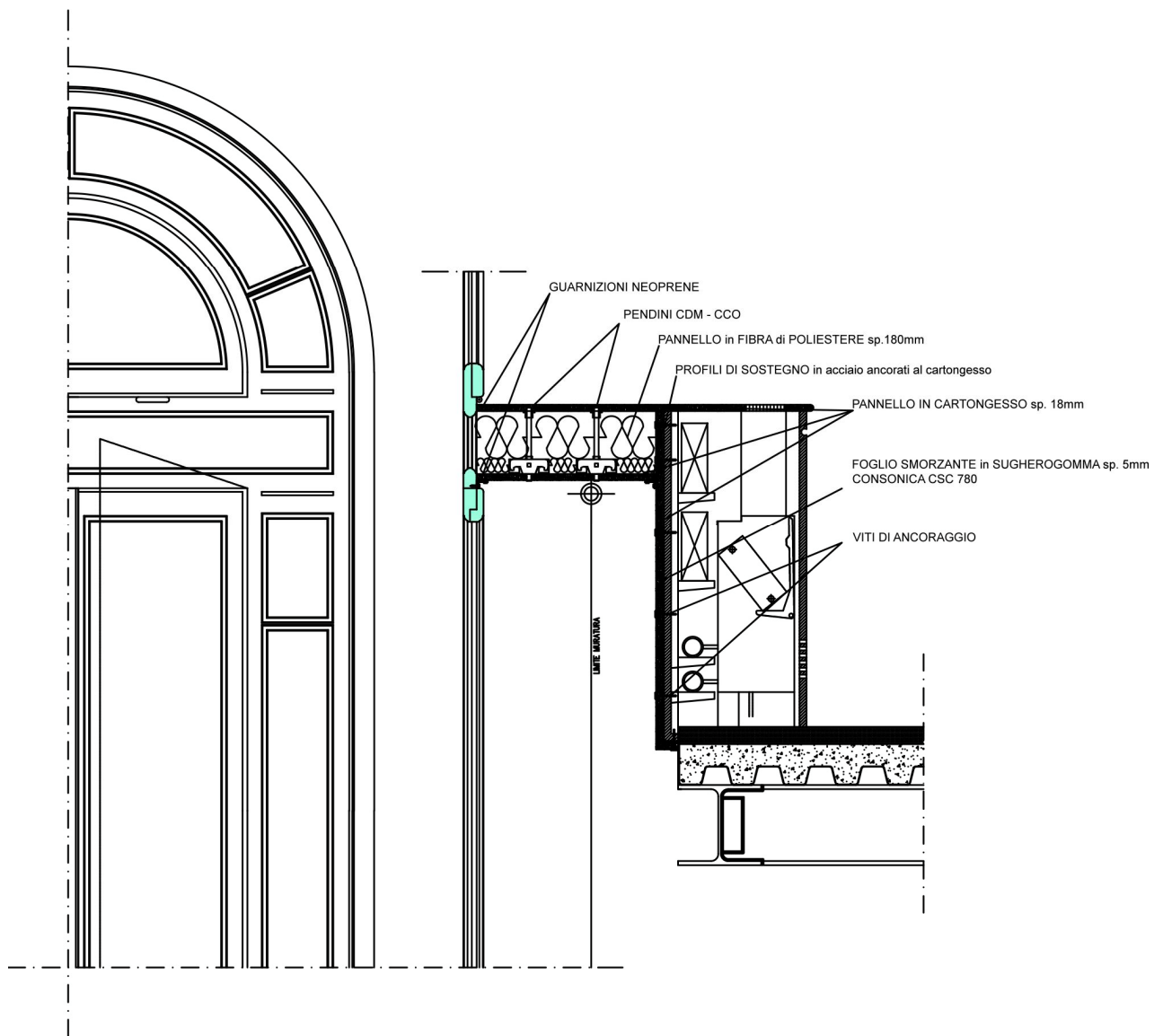


Figura 72 - Estratto dal progetto della soluzione 2

La soluzione prevede la rimozione dei pannelli lignei delle partizioni esistenti per rimpiazzarli con del cartongesso a doppio spessore(18mm) che vengono installati alle due estremità della zona rettangolare del serramento posta subito al di sotto dell'apertura semicircolare formando un vuoto di 18cm.

L'intero spazio verrà riempito con del materiale fonoassorbente (fibra di poliestere), la lastra sottostante verrà tenuta in posizione tramite dei pendini isolati e la battuta del serramento verrà attentamente siliconata dopo aver sistemato delle guarnizioni in neoprene che garantiranno l'impermeabilità dell'aria e quindi del suono stesso.

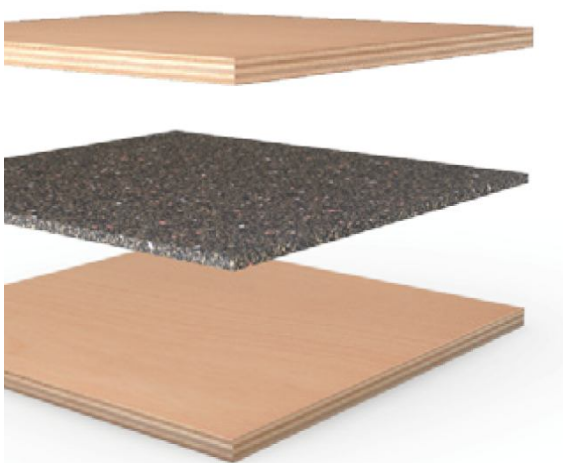
Alle spalle del vano contenente i fancoils verrà posto un foglio smorzante in gomma/sughero sp. 5mm. Tutte le giunture verranno controllate e siliconate così da garantire la perfetta tenuta all'aria dell'intera chiusura, poiché anche il più piccolo spiraglio consentirebbe al rumore di passare e questo inficerebbe il risultato atteso del nostro lavoro.

7.4. Soluzione 3

La terza soluzione studiata da noi è totalmente differente rispetto alle precedenti due poiché è basata sull'impiego di materiali altamente performanti che garantiscono il massimo livello ottenibile in termini di prestazioni acustiche, ma il costo globale di questa soluzione è indubbiamente troppo elevato per il budget a disposizione del Politecnico di Milano. Ad ogni modo abbiamo voluto descriverla per completezza di ricerca così da dare un quadro completo delle scelte possibili. In questo caso la scelta di materiali costosi non giustifica l'aumento di prestazione ottenuto, ma nel caso di destinazioni d'uso in cui l'isolamento acustico diventi

un elemento fondamentale per l'esercizio delle funzioni questa soluzione diventerebbe indispensabile.

Dal punto di vista tecnico questa soluzione prevede lo smontaggio completo di tutti i pannelli che compongono il rivestimento per sostituirli con un particolare materiale composito impiegato anche nell'industria navale: "isophon light".



È un pannello prefabbricato composto da due lastre di legno compensato con interposto un foglio smorzante in "sugherogomma" ed esso andrà a sostituire i pannelli lignei esistenti.

Figura 73 – Esploso di un pannello ISOPHON LIGHT

Nonostante l'impiego del nuovo materiale, sarà comunque previsto lo strato di materiale fono assorbente incassato nei pannelli di cartongesso posti al di sopra dell'apertura del serramento a battente verticale. Anche i giunti in neoprene saranno posati sulle battute del compensato contro il serramento e saranno controllate tutte le sigillature nei punti di congiunzione dei materiali e dei pannelli. Questa soluzione consente un forte abbattimento del passaggio di rumore tra i due livelli, tuttavia è evidente che per il

nostro caso l'elevato costo dei pannelli "isophon" è troppo sbilanciato rispetto all'aumento di prestazione ottenuto.

8.Valutazione e scelta della soluzione migliore

8.1. Metodo di valutazione

Per poter scegliere quale soluzione progettuale sia maggiormente indicata alle esigenze della committenza, si è svolta una piccola valutazione legata a parametri decisionali ben precisi:

- Considerazioni economiche;
- Tempistiche legate all'intervento;
- Specifiche tecniche;

L'utilizzo di parametri decisionali ci permette di scegliere la soluzione più vantaggiosa considerando gli ambiti che influenzano maggiormente il risultato finale dell'intervento.

Ognuno di questi parametri ha dei precisi indicatori capaci di dettagliare il tema di riferimento.

(Esempio: Specifiche tecniche è il parametro decisionale, mentre la conducibilità acustica ne rappresenta l'indicatore).

8.2. Considerazioni economiche

Le motivazioni principali che ci hanno spinto a dare un peso maggiore all'aspetto economico ci sono state suggerite dalla committenza stessa. Infatti durante l'intero periodo di collaborazione con la direzione lavori ci è stata spesso manifestata l'esigenza di limitare le spese, invitandoci anche a cercare soluzioni che potessero riciclare i materiali esistenti. Nonostante ciò, la scelta di una soluzione tecnica è generalmente spesso condizionata dal suo costo.

L'indicatore per il parametro legato alle considerazioni economiche è la somma dei costi dei materiali per unità di superficie, nonché della manodopera stimata per lo svolgimento delle fasi di lavoro previste dalla soluzione di riferimento.

Altri costi aggiuntivi, per esempio legati alla sicurezza, sono stati omessi in tale calcolo se pur importanti, per il semplice motivo che tali oneri si ripetono in ugual modo in tutte le soluzioni esposte e quindi il loro conteggio non condiziona la scelta finale.

SOLUZIONE 1-A (intervento dal piano superiore, locali a Nord dell'edificio)

Tabella 12 – Elenco lavorazioni riferite alla soluzione 1-A

ELENCO LAVORAZIONI		
1	Messa in sicurezza, della zona sottostante la soluzione tecnica interessata dall'intervento	interventi dal piano inferiore
2	Verifica delle fessure tra pannelli esistenti e sigillatura di eventuali fessurazioni con silicone	
3	Rimozione tenda di oscuramento	
4	Sigillatura di eventuali fessurazioni sulla parte verticale lignea (retro fancoil) con silicone	
5	Applicazione del foglio smorzante all'estradosso della parte verticale (retro fancoil), attraverso apposito collante	
6	Fissaggio del pannello in cartongesso sulla parte verticale della soluzione tecnica con viti apposite	
7	Sigillatura della battuta del pannello esistente sul telaio dell'infisso attraverso l'introduzione di guarnizioni in neoprene	Interventi dal piano superiore
8	Posizionamento della fibra di poliesteri, intervallata da appositi supporti	
9	Fissaggio del pannello ligneo sui supporti e sigillatura della battuta sul telaio dell'infisso con guarnizioni in neoprene	
10	Sigillatura di eventuali fessurazioni delle giunture tra pannelli lignei, con silicone	
11	Posizionamento della tenda precedentemente rimossa	intervento dal piano inferiore

Materiali utilizzati e relativo costo [12]

Tabella 13 - Materiali utilizzati e relativi costi riferiti alla soluzione 1-A

	MATERIALI UTILIZZATI	UNITA' DI MISURA	QUANTITA' /m lineare della soluzione	COSTO UNITARIO (€) per unità di misura	TOTALE
Soluzione 1-A	Pannello ligneo sp.20mm	m ²	0,595	12,02	7,15
	Supporti elastici- Consonica CDM tipo CSC WOOD STRIPS	cad	2	0,21	0,42
	Fibra di poliestere sp. 50mm	m ²	0,525	11,36	5,96
	Guarnizioni in neoprene- PIGOMMA	m	2	0,58	1,16
	Pannello di cartongesso sp.18mm	m ²	0,836	8,5	7,11
	Foglio smorzante in gomma/sughero sp.5mm- ISOPHON LIGHT	m ²	0,98	2,96	2,90
	Viti di ancoraggio	cad	6	0,31	1,86
				TOTALE €/m²	18,99

SOLUZIONE 1-B (intervento dal piano inferiore, locali a Sud dell'edificio)

Tabella 14 – Elenco delle lavorazioni riferite alla soluzione 1-B

ELENCO LAVORAZIONI		Interventi svolti dal piano inferiore
1	Messa in sicurezza, della zona sottostante la soluzione tecnica interessata dall'intervento	
2	Verifica delle fessure tra pannelli esistenti	
3	Rimozione tenda di oscuramento	
4	Sigillatura di eventuali fessurazioni sulla parte verticale lignea (retro fancoil) con silicone	
5	Applicazione del foglio smorzante all'estradosso della parte verticale (retro fancoil), attraverso apposito collante	
6	Fissaggio del pannello in cartongesso sulla parte verticale della soluzione tecnica con viti apposite	
7	Sigillatura della battuta del pannello esistente sul telaio dell'infisso attraverso l'introduzione di guarnizioni in neoprene	
8	Posizionamento della fibra di poliestere, intervallata da appositi supporti	
9	Fissaggio del pannello ligneo sui supporti e sigillatura della battuta sul telaio dell'infisso con guarnizioni in neoprene	
10	Sigillatura di eventuali fessurazioni delle giunture tra pannelli lignei, con silicone	
11	Posizionamento della tenda di oscuramento, precedentemente rimossa	

Materiali utilizzati e relativo costo [12]

Tabella 15 - Materiali utilizzati e relativi costi riferiti alla soluzione 1-B

	MATERIALI UTILIZZATI	UNITA' DI MISURA	QUANTITA' /m lineare della soluzione	COSTO UNITARIO (€)	TOTALE
Soluzione 1-B	Pannello ligneo sp.20mm	m ²	0,472	12,02	5,67
	Pendini Consonica CDM tipo CCO	cad	2	0,37	0,74
	Fibra di poliestere sp. 50mm	m ²	0,492	11,36	5,59
	Guarnizioni in neoprene-PIGOMMA	m	2	0,58	1,16
	Pannello di cartongesso sp.18mm	m ²	0,836	8,5	7,11
	Foglio smorzante in gomma/sughero sp.5mm- ISOPHON LIGHT	m ²	0,98	2,96	2,90
	Viti di ancoraggio	cad	6	0,31	1,86
				TOTALE €/m²	25,03

Il costo della manodopera è calcolato sulle tempistiche stimate nel capitolo successivo, attribuendo il costo indicativo oraio ed ipotizzando che i lavori vengano svolti da un operaio comune (30,92 €/h) e da un operaio qualificato (34,39 €/h).

Costo della Manodopera per la soluzione 1 (A +B)=

$$(1,212 \text{ h} \times 30,92\text{€/h}) + (1,212 \text{ h} \times 34,39) = 37,47 + 41,68 = 79,15\text{€}$$

Costo totale SOLUZIONE 1 =

Costo materiali necessari al m²+ costo della manodopera al m² =

$$79,15 + (25,03 + 18,99) / 2 =$$

Il costo dell'intera SOLUZIONE 1 quindi Risulta essere:

$$= 79,15 + 22,01 = 101,16 \text{ €/m}^2$$

SOLUZIONE 2 (soluzione univoca per tutti gli spazi interessati dall'intervento)

Tabella 16 – Elenco delle lavorazioni riferite alla soluzione 2

ELENCO LAVORAZIONI		
1	Messa in sicurezza, della zona sottostante la soluzione tecnica interessata dall'intervento	Interventi svolti al piano inferiore
2	Rimozione tenda di oscuramento	
3	Rimozione dei pannelli lignei orizzontali esistenti	intervento svolto dal piano superiore
4	Sigillatura di eventuali fessurazioni sulla parte verticale lignea (retro fancoil) con silicone	Interventi svolti dal piano inferiore
5	Applicazione del foglio smorzante all'estradosso della parte verticale (retro fancoil), attraverso apposito collante	
6	Fissaggio del pannello in cartongesso sulla parte verticale della soluzione tecnica con viti apposite	
7	Sigillatura di eventuali fessurazioni con silicone	
8	Posizionamento del pannello in cartongesso orizzontale soprastante e fissaggio del componente	interventi svolti dal piano superiore
9	Sigillatura della battuta sul telaio dell'infisso attraverso guarnizioni in neoprene	
10	Applicazione dello strato isolante in fibra di poliestere intervallato da appositi pendini per strato inferiore	Interventi svolti dal piano inferiore
11	Posizionamento del pannello in cartongesso orizzontale sottostante e fissaggio con pendini pre installati	
12	Sigillatura della battuta sul telaio dell'infisso attraverso guarnizioni in neoprene	
13	Ulteriore fissaggio di sostegno alla parte verticale ed al telaio dell'infisso attraverso apposite staffe	
14	Sigillatura "ermetica" delle giunture tra pannelli, con silicone	
15	Posizionamento della tenda di oscuramento, precedentemente rimossa	

Materiali utilizzati e relativo costo [12]

Tabella 17 - Materiali utilizzati e relativi costi riferiti alla soluzione 2

	MATERIALI UTILIZZATI	UNITA' DI MISURA	QUANTITA' /m lineare della soluzione	COSTO UNITARIO (€)	TOTALE
Soluzione 2	Pannello di cartongesso sp.18mm	m ²	2,427	8,5	20,63
	Guarnizioni in neoprene-PIGOMMA	cad	2	0,58	1,16
	Pendini Consonica CDM tipo CCO	cad	2	0,37	0,74
	Fibra di poliestere sp. 180mm	m ²	0,517	11,36	5,87
	Profili di sostegno in acciaio con viti di ancoraggio	cad	2	0,94	1,88
	Foglio smorzante in gomma/sughero sp.5mm- ISOPHON LIGHT	m ²	0,98	2,96	2,90
	Viti di ancoraggio	cad	6	0,31	1,86
				TOTALE €/m²	35,04

Il costo della manodopera è calcolato sulle tempistiche stimate nel capitolo successivo, attribuendo il costo indicativo oraio ed ipotizzando che i lavori vengano svolti da un operaio comune (30,92 €/h) e da un operaio qualificato (34,39 €/h).

Costo della Manodopera per la soluzione 2 =

$$(1,89\text{h/m}^2 \times 30,92 \text{ €/h}) + (1,89 \text{ h} \times 34,39\text{€/h}) = 58,43 + 64,99 =$$

$$= 123,42 \text{ €/m}^2$$

$$\text{Costo totale intervento SOLUZIONE 2} = 123,42 + 35,04 = 158,46 \text{ €/m}^2$$

8.3. Tempistiche legate all'intervento

Lo scarso tempo a disposizione per l'esecuzione dei lavori, già dalla fase progettuale, è uno degli aspetti più critici dell'intervento in questione.

Alcune zone interessate dall'intervento, infatti, necessitano di riacquisire in tempi brevi, la normale fruizione degli spazi.

Le tempistiche legate all'intervento sono state stimate attraverso la consultazione del tempario delle opere edili e civili e nel caso di mancanza delle voci specifiche si sono consultate quelle che più si avvicinano alle voci ricercate. [11]

SOLUZIONE 1-A

Tabella 18 - Elenco delle lavorazioni e relativi tempi di lavorazione riferiti alla soluzione 1-A

	ELENCO LAVORAZIONI	Tempo per lavorazione (h/mq)	
1	Messa in sicurezza, della zona sottostante la soluzione tecnica interessata dall'intervento	0,16	interventi dal piano inferiore
2	Verifica delle fessure tra pannelli esistenti e sigillatura di eventuali fessurazioni con silicone	0,08	
3	Rimozione tenda di oscuramento	0,032	
4	Sigillatura di eventuali fessurazioni sulla parte verticale lignea (retro fancoil) con silicone	0,032	
5	Applicazione del foglio smorzante all'estradosso della parte verticale (retro fancoil), attraverso apposito collante	0,2	
6	Fissaggio del pannello in cartongesso sulla parte verticale della soluzione tecnica con viti apposite	0,16	
7	Sigillatura della battuta del pannello esistente sul telaio dell'infisso attraverso l'introduzione di guarnizioni in neoprene	0,08	Interventi dal piano superiore
8	Posizionamento della fibra di poliestere, intervellata da appositi supporti	0,16	
9	Fissaggio del pannello ligneo sui supporti e sigillatura della battuta sul telaio dell'infisso con guarnizioni in neoprene	0,16	
10	Sigillatura di eventuali fessurazioni delle giunture tra pannelli lignei, con silicone	0,032	
11	Posizionamento della tenda precedentemente rimossa	0,032	intervento dal piano inferiore
	Totale al m ²	1,128	

SOLUZIONE 1-B

Tabella 19 - Elenco delle lavorazioni e relativi tempi di lavorazione riferiti alla soluzione 1-B

	ELENCO LAVORAZIONI	Tempo per lavorazione (h/mq)	
1	Messa in sicurezza, della zona sottostante la soluzione tecnica interessata dall'intervento	0,16	Interventi svolti dal piano inferiore
2	Verifica delle fessure tra pannelli esistenti	0,08	
3	Rimozione tenda di oscuramento	0,2	
4	Sigillatura di eventuali fessurazioni sulla parte verticale lignea (retro fancoil) con silicone	0,032	
5	Applicazione del foglio smorzante all'estradosso della parte verticale (retro fancoil), attraverso apposito collante	0,2	
6	Fissaggio del pannello in cartongesso sulla parte verticale della soluzione tecnica con viti apposite	0,16	
7	Sigillatura della battuta del pannello esistente sul telaio dell'infisso attraverso l'introduzione di guarnizioni in neoprene	0,08	
8	Posizionamento della fibra di poliestere, intervellata da appositi supporti	0,16	
9	Fissaggio dell pannello ligneo sui supporti e sigillatura della battuta sul telaio dell'infisso con guarnizioni in neoprene	0,16	
10	Sigillatura di eventuali fessurazioni delle giunture tra pannelli lignei, con silicone	0,032	
11	Posizionamento della tenda di oscuramento, precedentemente rimossa	0,032	
	Totale al m ²	1,296	

CALCOLO TOTALE SOLUZIONE 1

Tempo totale per lo svolgimento della soluzione A: 1,128 h/m²

Tempo totale per lo svolgimento della soluzione B: 1,296 h/m²

m² lineari totali della soluzione A+ B : 40 m

Tempo totale per l'esecuzione dell'opera, visto che la soluzione si suddivide in due parti uguali all'incirca :

$$(1,128+1,296)/2 \times 40 = 48,48 \text{ h, circa 6,5 giornate di lavoro.}$$

SOLUZIONE 2

Tabella 20 - Elenco delle lavorazioni e relativi tempi di lavorazione riferiti alla soluzione 2

	ELENCO LAVORAZIONI	Tempo per lavorazione (h/mq)	
1	Messa in sicurezza, della zona sottostante la soluzione tecnica interessata dall'intervento	0,16	Intervento svolto al piano inferiore
2	Rimozione tenda di oscuramento	0,032	
3	Rimozione dei pannelli lignei orizzontali esistenti	0,16	intervento svolto dal piano superiore
4	Sigillatura di eventuali fessurazioni sulla parte verticale lignea (retro fancoil) con silicone	0,032	Interventi svolti dal piano inferiore
5	Applicazione del foglio smorzante all'estradosso della parte verticale (retro fancoil), attraverso apposito collante	0,2	
6	Fissaggio del pannello in cartongesso sulla parte verticale della soluzione tecnica con viti apposite	0,16	
7	Sigillatura di eventuali fessurazioni con silicone	0,032	

8	Posizionamento del pannello in cartongesso orizzontale soprastante e fissaggio del componente	0,16	intervento svolto dal piano superiore
9	Sigillatura della battuta sul telaio dell'infixo attraverso guarnizioni in neoprene	0,16	
10	Applicazione dello strato isolante in fibra di poliestere intervallato da appositi pendini per strato inferiore	0,16	Interventi svolti dal piano inferiore
11	Posizionamento del pannello in cartongesso orizzontale sottostante e fissaggio con pendini pre installati	0,16	
12	Sigillatura della battuta sul telaio dell'infixo attraverso guarnizioni in neoprene	0,16	
13	Ulteriore fissaggio di sostegno alla parte verticale ed al telaio dell'infixo attraverso apposite staffe	0,25	
14	Sigillatura "ermetica" delle giunture tra pannelli, con silicone	0,032	
15	Posizionamento della tenda di oscuramento, precedentemente rimossa	0,032	
	Totale al m ²	1,89	

CALCOLO TOTALE SOLUZIONE 2

Tempo totale per lo svolgimento della soluzione 2: 1,89 h/m²

m² lineari totali della soluzione : 40 m

Tempo totale per l'esecuzione dell'opera : 1,89 x 40 =

= **75,6 h**

8.4. Specifiche tecniche

Un altro aspetto importante di valutazione è legato alle specifiche tecniche della soluzione. Il risultato dell'intervento è influenzato principalmente dal raggiungimento degli obiettivi stabiliti, derivanti dalle prestazioni offerte dai materiali e da un corretto uso e posa in opera di questi.

L'utilizzo di materiali differenti determina le diverse performance tra le soluzioni.

SOLUZIONE 1-A porzione orizzontale della soluzione

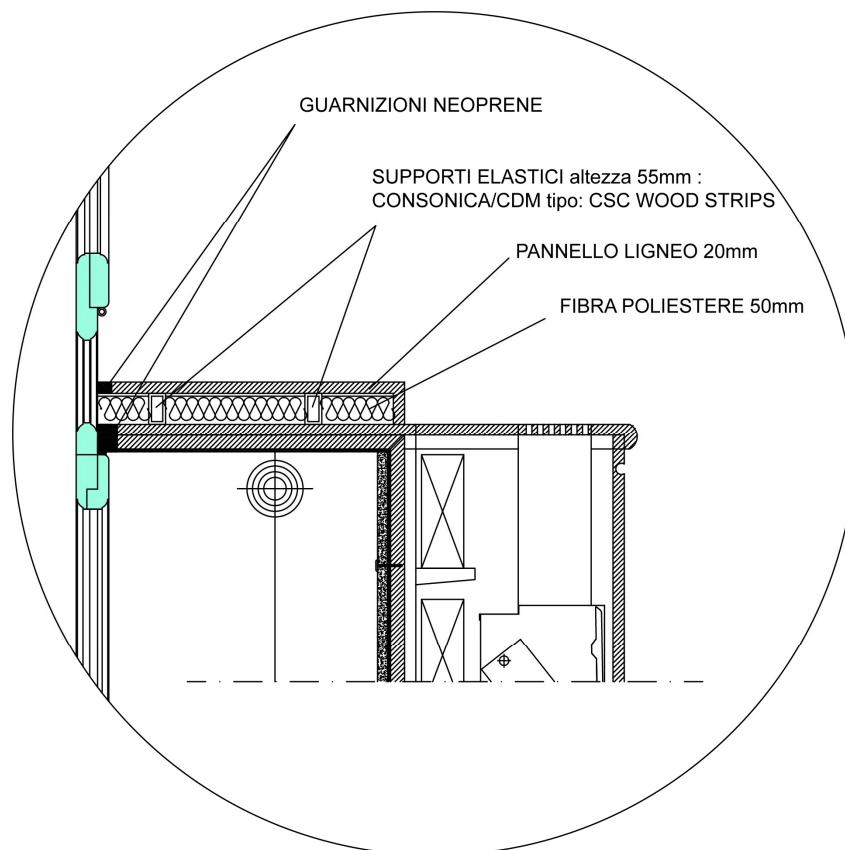


Figura 74 - Soluzione 1-A : ingrandimento dalla parte orizzontale

- Guarnizione in neoprene (Scheda tecnica ALLEGATO I)

Gomma espansa a cellule chiuse in lastre, rotoli e profili;

Densità da 60 kg/m³ a 350 kg/m³;

Resistenza alla temperatura: da -40°C a +120°C ;

Spessore da 1,5mm a 70mm;

Guarnizioni fustellate, fresate o tagliate ad acqua.



Figura 75 - Varie forme e soluzioni di guarnizione in neoprene

- Supporti elastici CONSONICA /CDM, tipo CSC wood strips (Scheda tecnica ALLEGATO II)



Figura 76 - Tipo di supporto

Strisce di legno multistrato di pino fenolico, con supporti elastici incollati mediante colla poliuretanicca.

- * Pannello Ligneo multistrati , sp. 20mm (scheda tecnica ALLEGATO III)



Figura 77 - Foto tipo di un pannello ligneo multistrato

- Fibra di poliestere AKUSTIK® soft (Scheda tecnica ALLEGATO IV)

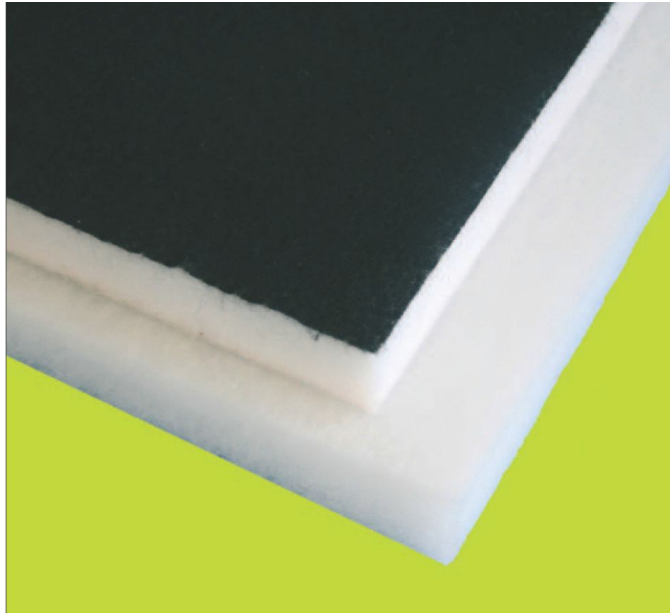


Figura 78 - Foto da catalogo della fibra di poliestere AKUSTIK

Fibra di poliestere pura al 100% di colore bianco latte. Il materiale è inodore, atossico e non crea alcun problema a contatto con l'epidermide; non è pulvirulento e non degrada, mantiene le sue caratteristiche inalterate nel tempo ed inoltre è riciclabile.

L'Akustik soft trova largo utilizzo quale materassino per l'isolamento termico e acustico sopra i controsoffitti di ogni genere, nelle intercapedini di tramezzature e contro pareti in cartongesso o in muratura.

Calcolo dell'aumento di potere fonoisolante R_w :

Soluzione 1 A		
R_w' =	36 dB	Potere fonoisolante della chiusura allo stato di fatto
m_1 =	10 Kg/m ²	Pannello in multistrato ligneo sp. 20mm
m_2 =	22,5 Kg/m ²	Pannello in multistrato ligneo sp. 45mm
d =	0,05 m	Fibra di poliestere
S_0' =	2 MN/m ³	rigidità dinamica dell'aria contenuta nel materiale elastico
f_0 =	85,99742 Hz	frequenza propria del sistema risonante
Metodo semplificato		Metodo da manuale
ΔR_w =	$32 - R_w/2 = 14$ dB	$\Delta R_w = 15,31029$ dB
R_w'' =	50 dB	$R_w'' = 51,31029$ dB

SOLUZIONE 1-A porzione verticale della soluzione

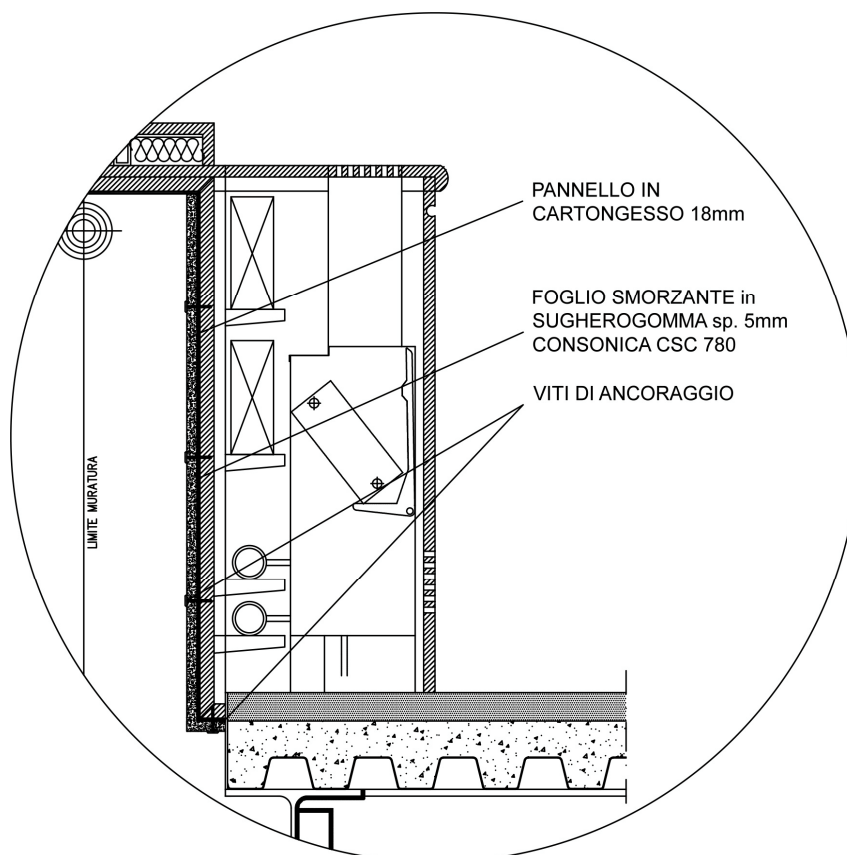


Figura 79 - Soluzione 1-A : ingrandimento della parte verticale

- Pannello in cartongesso doppia lastra sp. Totale 18mm
(Scheda tecnica ALLEGATO V)



Figura 80 - Pannelli di cartongesso a doppia lastra

- Foglio smorzante in Sugherogomma ISOPHON LIGHT® sp.5mm
(Scheda tecnica ALLEGATO VI)



Figura 81 - immagine da catalogo foglio in sugherogomma

Guaina in sugherogomma, ad alta densità (780 kg/m³ ca.), garantisce un ottimo isolamento acustico in spessori ristretti. Con soli 3mm, infatti, è possibile raggiungere un grado di insonorizzazione di 30,0 dB.

Il materiale viene accostato al pannello ligneo verticale preesistente e rivestito da un doppio pannello di cartongesso.

SOLUZIONE 1-B porzione orizzontale della soluzione

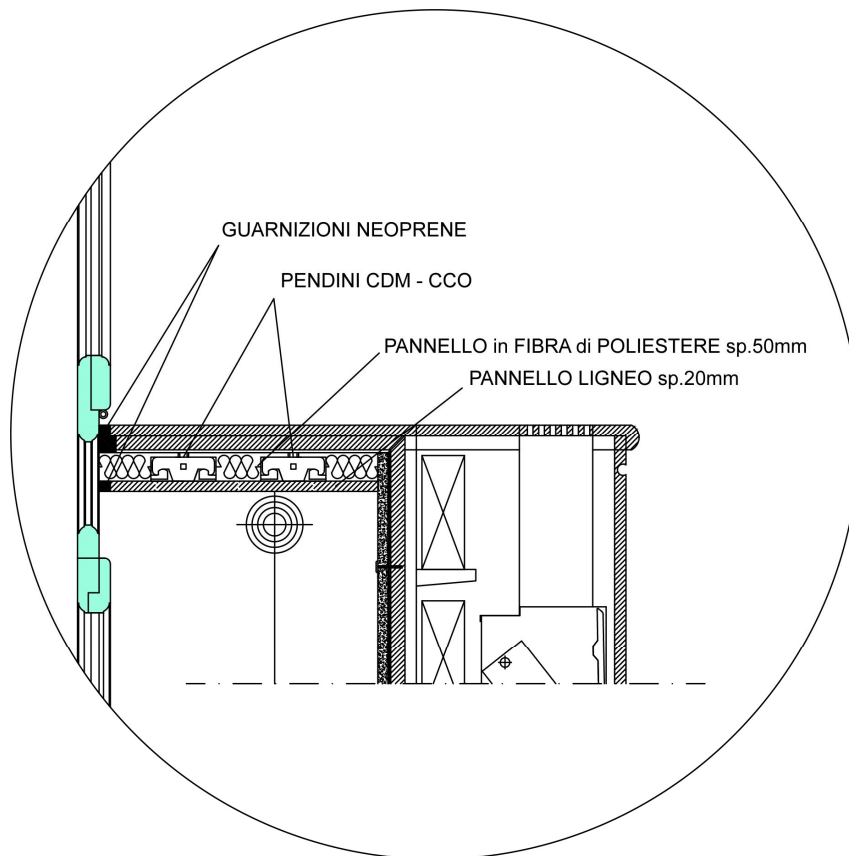


Figura 82 – Soluzione 1-B , ingrandimento della parte orizzontale

Come visto nella descrizione delle diverse soluzioni proposte, la variante 1-B si differenzia dalla 1-A solamente per la porzione orizzontale dove l'intervento, anziché interessare la parte superiore, agendo quindi dal Piano Soppalco, consiste nell'applicazione di un "cappotto acustico" all'intradosso della soluzione, agendo quindi dal Piano Terra.

La tipologia di materiali previsti è la medesima, con l'eccezione che riguarda la modalità di ancoraggio del pannello ligneo inferiore alla

struttura preesistente, racchiudendo al suo interno la fibra di poliestere:

* Pendini modello CDM CCO (Scheda tecnica ALLEGATO VII)



Figura 83 – Immagine da scheda tecnica, pendini CDM CCO

Calcolo dell'aumento di potere fonoisolante R_w :

<u>Soluzione 1 B</u>			
R_w' =	38 dB	Potere fonoisolante della chiusura allo stato di fatto	
m_1 =	8 Kg/m ²	Pannello in compensato ligneo sp. 20mm	
m_2 =	8 Kg/m ²	Pannello in compensato ligneo sp. 20mm	
d =	0,05 m	Fibra di poliestere	
S_0' =	2 MN/m ³	rigidità dinamica dell'aria contenuta nel materiale elastico	
f_0 =	113,1371 Hz	frequenza propria del sistema risonante	
Metodo semplificato		Metodo da manuale	
ΔR_w =	$32 - R_w / 2 =$ 13 dB	ΔR_w =	11,9279 dB
R_w'' =	51 dB	R_w'' =	49,9279 dB

SOLUZIONE 2

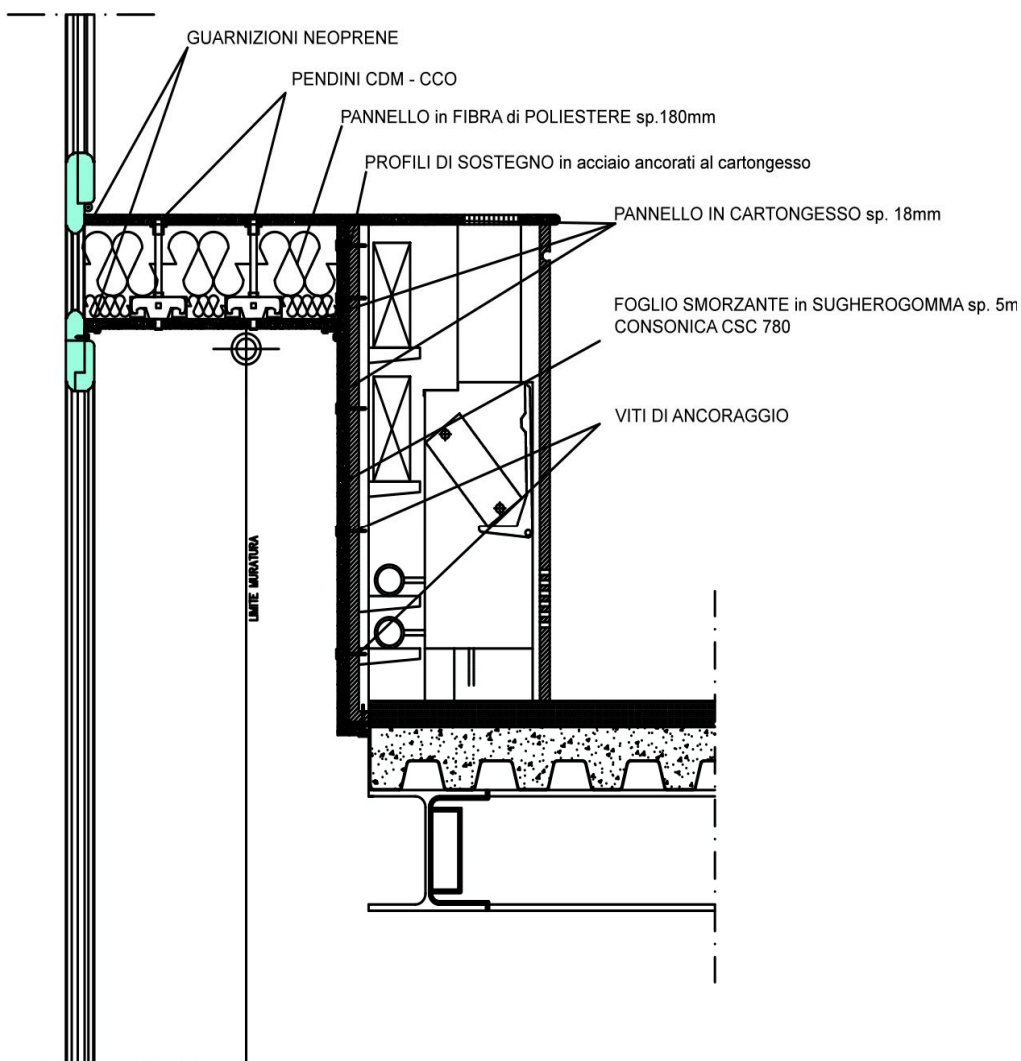


Figura 84 – Estratto dal progetto, ingrandimento della soluzione 2

Come introdotto in precedenza la soluzione è del tutto simile alla precedente. Si possono notare cambiamenti di spessore che interessano la porzione orizzontale, in quanto viene “ingombrata” totalmente la porzione rettangolare al di sotto della mezzaluna dell’infisso (18cm), e viene sostituito in toto il materiale ligneo che compone il piano superiore al fancoil, fino alla battuta sull’infisso. Per quanto riguarda invece la porzione verticale, la soluzione

rispecchia nei materiali e negli spessori, quella precedentemente esposta.

I diversi risultati, tuttavia, possono essere verificati precisamente solo attraverso un nuovo rilievo acustico condotto allo stesso modo e nei medesimi spazi in cui è stato svolto in fase preliminare.

Calcolo dell'aumento di potere fonoisolante R_w :

Soluzione 2			
R_w' =	37 dB	Media dei poteri fonoisolanti delle chiusure allo stato di fatto	
m_1 =	15 Kg/m ²	Pannello incartongesso sp. 18mm	
m_2 =	15 Kg/m ²	Pannello incartongesso sp. 18mm	
d =	0,18 m	Fibra di poliestere	
S_0' =	0,555556 MN/m ³	rigidità dinamica dell'aria contenuta nel materiale elastico	
f_0 =	43,54648 Hz	frequenza propria del sistema risonante	
Metodo semplificato		Metodo da manuale	
ΔR_w =	$35 - R_w/2 = 16,5$ dB	ΔR_w =	20,72094 dB
R_w'' =	53,5 dB	R_w'' =	57,72094 dB

8.5. Valutazione finale

Dopo aver attentamente analizzato sia le tempistiche di realizzazione di ogni singola soluzione che i relativi costi possiamo ora fare delle considerazioni sulle nostre condizioni al contorno. La soluzione che prevede tempistiche e costi ragionevoli, legata anche ad un buon livello di isolamento acustico, risulta essere la soluzione 2. Essa prevede lo smontaggio dei pannelli preesistenti e la realizzazione di una partizione omogenea fra i lati nord e sud del padiglione, così facendo anche la gestione della manutenzione e dei conseguenti interventi risulta agevolata. Anche dal punto di vista prestazionale la soluzione che prevede l'installazione di pannelli di cartongesso (materiale acusticamente migliore del legno) garantirebbe sicuramente un maggior comfort. Ma le strette tempistiche e l'ancor più scarsa dotazione economica concessa al Politecnico per la riqualificazione ci ha portato a considerare le scelte 1A e 1B come le più adatte. Esse non prevedono nessuno smontaggio, velocizzando così di molto i tempi di realizzazione, senza contare le eventuali polveri e i disagi per lo stoccaggio dei materiali da smaltire. Anche il basso costo dell'intervento ha avuto particolare peso nella scelta della soluzione più conforme alle nostre esigenze. La vera criticità delle soluzioni da noi scelte risiede nel controllo in fase di montaggio dei nuovi pannelli e nella sigillatura dei pannelli esistenti, poiché fessure di pochi millimetri potrebbero inficiare notevolmente il risultato atteso. Tuttavia noi

prevediamo per le soluzioni 1A e 1B un valore atteso di potere fonoisolante pari a 49dB che, anche se leggermente inferiore alle prescrizioni normative sulle nuove edificazioni (vedi paragrafo 5.2), consentirebbero un notevole miglioramento delle condizioni di comfort all'interno dei locali.

Metodo di valutazione

Sono stati definiti i valori che caratterizzano la classe di valutazione, relativamente ai risultati ottenuti dalle analisi svolte

OTTIMO	BUONO	SCARSO
--------	-------	--------

COSTO	
3	minore di 150 €/m ²
2	da 150 a 300 €/m ²
1	maggiore di 300 €/m ²

TEMPISTICHE DI INTERVENTO	
3	minore di 1,5 h
2	da 1,5 a 2 h
1	maggiore di 2 h

SPECIFICHE TECNICHE:	
1	soluzione poco performante
2	soluzione performante, materiali poco performanti
3	soluzione e materiali performanti

Valutazione

Tabella 21 – Tabella valutazione soluzioni tecniche senza pesi

	COSTO	TEMPISTICHE DI INTERVENTO	SPECIFICHE TECNICHE	Totali
SOLUZIONE 1-A SOLUZIONE 1-B	3	3	1	7
SOLUZIONE 2	2	3	2	7
SOLUZIONE 3	1	1	3	5

Dalla tabella si evince come la soluzione 1 e la soluzione 2 raggiungono pari punteggio, ma per meglio interpretare le nostre condizioni al contorno dettate dalla committenza, abbiamo inserito un peso (crescente proporzionalmente alla sua importanza) per ogni parametro di valutazione.

Tabella 22 – Tabella di valutazione soluzione tecnica con i rispettivi pesi assegnati

	COSTO	TEMPISTICHE DI INTERVENTO	SPECIFICHE TECNICHE	Parziali	Totali
Pesi di valutazione	50%	30%	20%		
SOLUZIONE 1-A SOLUZIONE 1-B	3	3	1	1,5 + 0,9 + 0,04	2,44
SOLUZIONE 2	2	3	2	1 + 0,9 + 0,4	2,3
SOLUZIONE 3	1	1	3	0,25 + 0,09 + 0,6	0,94

Dalla tabella implementata dei pesi si può facilmente dedurre come la soluzione 1 sia la più indicata per il nostro caso di studio.

9. Conclusioni

Questo lavoro ha portato alla definizione di tre diverse soluzioni tecniche che rispondono a differenti priorità e differenti prestazioni. Una volta definite le priorità e i limiti del politecnico di Milano si è riusciti a trovare la soluzione migliore da applicare al caso di studio in oggetto. Le soluzioni che sono state analizzate vogliono essere un esempio di “*Soluzione Tipo*” che potrà essere applicata a tutti gli edifici del campus Leonardo che sono soggetti allo stesso tipo di problematiche. Questo elaborato si è concentrato su un aspetto molto tecnico dell'edificio di riferimento, ma è importante porre l'accento non solo sui *risultati tecnologici*, ma anche sul *processo*. La strada percorsa per giungere alla definizione delle tre diverse tecnologie è stato un chiaro esempio di *iter procedurale* da seguire nel caso di gestione di un edificio esistente. Un “building manager” deve sempre partire dai “*segnali/in-put*” generati dagli utenti dell'edificio stesso, attraverso interviste o questionari e definendo gli standard prestazionali che desidera raggiungere in funzione del miglioramento della condizione fisica dell'edificio e del comfort degli occupanti. Una volta definiti i livelli prestazionali e le gerarchie d'intervento sarà poi compito del manager (o di un tecnico incaricato) di studiare delle soluzioni tecnologiche adatte per la tipologia ed intensità dei singoli problemi riscontrati. Un altro importante passaggio da seguire è la verifica dell'effettivo raggiungimento dei livelli prefissati, attraverso misurazioni in loco, sia

con strumenti di misurazione o anche semplicemente intervistando i fruitori dei locali interessati. Purtroppo, per le tempistiche troppo stringenti inerenti la consegna del presente elaborato, non abbiamo potuto procedere con la verifica strumentale dell'effettivo aumento di potere fonoisolante raggiunto attraverso il nostro intervento, ma nella normale prassi questa è un indispensabile passaggio che consente al tecnico di capire se la propria soluzione sia conforme alle aspettative. Questo gli consente altresì di capire come comportarsi in futuro nel caso si presentassero simili problematiche. Il controllo della progettazione e l'attenta analisi in sede progettuale di tutti i possibili aspetti critici di un intervento riducono il più possibile problematiche come quelle da noi registrate, ma a volte il cambio di destinazione d'uso dei locali, le evoluzioni tecnologiche e l'innalzamento dei livelli prestazionali richiesti dalle normative rendono comunque necessari interventi di riqualificazione come quello oggetto di questo elaborato. Tuttavia uno strumento che garantirà di mantenere sempre in efficienza e monitorato l'edificio è il *piano di manutenzione*, elemento che permetterà di limitare il più possibile interventi cosiddetti "a guasto avvenuto" e di poter programmare interventi di adeguamento tecnologico dovuto all'aggiornamento degli elementi divenuti obsoleti.

La realizzazione di questo progetto ha voluto essere un chiaro esempio di come un'attenta e scrupolosa cura dell'ambiente

costruito unitamente alla volontà di intervenire per migliorarne le condizioni attuali per la vita dei lavoratori possano contribuire ad un significativo miglioramento dello status dell'ambiente lavorativo stesso, del benessere e della qualità della vita degli occupanti.

10. Ringraziamenti

Un grazie particolare lo riserviamo ai nostri genitori per averci dato la possibilità di perseguire i nostri sogni e i nostri obbiettivi, per i loro sacrifici per permetterne il raggiungimento, per averci sempre sostenuto durante questo percorso, per aver creduto in noi e nelle nostre capacità.

Un grazie di cuore a tutti i nostri familiari, i fratelli e gli amici che ci hanno accompagnato in questo cammino che abbiamo intrapreso. Un altro grazie speciale va alle nostre rispettive fidanzate che ci hanno sopportato e supportato anche nei momenti meno facili del nostro percorso.

Un sentito grazie va al Professore Bruno Daniotti per averci concesso la sua disponibilità, per tutti i consigli e le conoscenze che ha saputo fornirci arricchendo ulteriormente il nostro bagaglio culturale e all'ingegner Marcello Brugola, nostro punto di riferimento principale, per le sua professionalità, la gentilezza, la pazienza, nonché per la disponibilità e il preziosissimo aiuto fornitoci per il reperimento delle informazioni utili ed essenziali per la realizzazione di questa tesi.

Ringraziamo, inoltre, tutto lo staff dell'AGIS del Politecnico di Milano, in particolare:

- *il dott. Iridile per averci accompagnato durante la ricerca documentale e nella scoperta dei tutt'altro che semplici "meccanismi del Politecnico", sempre con grande disponibilità, umanità e simpatia.*
- *Il dott. Leanza e il dott. Furfaro Serranò, quali nostre voci-guida nel mondo del "building management" e nostri primi "committenti", li ringraziamo per la pazienza e l'enorme disponibilità che ci hanno dimostrato.*

Alessio e Marco

11. Bibliografia

- [1] GIUSEPPE TURCHINI, capitolo: "Qualità nella progettazione edilizia e variazioni nel quadro di riferimento esigenziale", in "Progetto Qualità edilizia" (a cura di Gianpaolo Calvi), ALER PAVIA Azienda Lombarda per l'edilizia residenziale della Provincia di Pavia, Edizioni Edilizia Popolare, anno 2002.
- [2] PIETRO NATALE MAGGI, capitolo: "Qualità e sostenibilità delle soluzioni tecniche nel progetto", in "Progetto Qualità Edilizia", (a cura di Gianpaolo Calvi), ALER PAVIA Azienda Lombarda per l'edilizia residenziale della Provincia di Pavia, Edizioni Edilizia Popolare, edizione 2002.
- [3] PAOLO GASPAROLI, CINZIA TALAMO, "Manutenzione e recupero: criteri, metodi e strategie per l'intervento sul costruito", Alinea editrice edizione 2006
- [4] ANTONIO SCOCCIMARRO, VALERIO DI BATTISTA, CLAUDIO MOLINARI, "l'intervento sul costruito: problemi e orientamenti", (a cura di Elisabetta Ginelli), Ricerche di tecnologia dell'architettura FRANCOANGELI, edizione 2002.
- [5] BRUNO DANIOTTI, "Durabilità e manutenzione edilizia", editore UTET scienze tecniche, edizione 2012
- [6] CLAUDIO MOLINARI, "Procedimenti e metodi della manutenzione edilizia, Volume 1°, la manutenzione come requisito di progetto", Sistemi editoriali, gruppo Editoriale Esselibri, edizione 2002.
- [7] MARCO LORENZO TRANI, capitolo: n°2 "Analisi delle criticità incidenti sull'intervento", in "Cantieri edili e civili: Progetto, organizzazione, gestione", Maggioli Editore edizione 2012.
- [8] F. ALTON EVEREST, "Manuale di Acustica: concetti fondamentali – acustica degli interni", Editore Ulrico HOEPLI Milano, edizione 1996.
- [9] FRANCO BERTELLINO, ENRICO NATALINI, "Isolamento acustico in edilizia: progettazione, collaudo, verifica", Dario Flaccovio Editore, edizione 2006.
- [10] RENATO SPAGNOLO, "Manuale di acustica applicata" Città studi edizioni, edizione 2008.
- [11] LUIGI GROSSO, "Tempario delle opere edili civili. Nuove costruzioni, manutenzione e ristrutturazione", Il sole 24 ore Editore, Edizione 2007.
- [12] COMUNE DI MILANO, Area territorio, "Listino Prezzi per l'esecuzione di opere pubbliche e manutenzioni" volume 2.1, Edizione 2013.

Normative consultate

- [13] UNI IN 12354: "Acustica in edilizia. Valutazione delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti";
- [14] DPCM 05/12/1997: "Acustica. Determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici";
- [15] UNI EN ISO 140: "Acustica. Misurazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio";
- [16] UNI EN ISO 717: "Acustica. Definizione degli indici di valutazione delle grandezze per l'isolamento acustico per via aerea in edifici e di elementi di edificio";
- [17] UNI EN ISO 16283:2014 : "Misure in opera dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio". La presente norme sostituisce la UNI EN ISO 140-14 , 140-4 , 140-5 , 140 -7 ;
- [18] UNI 8270/8 – Acustica – Misura dell'isolamento acustico di edifici ed elementi di edifici – misure di laboratorio dell'isolamento acustico dei rumori di calpestio di rivestimenti di pavimentazioni.
- [19] ISO 354 (1985) Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room (Mesurage de l'absorption acoustique en salle réverbérante)
- [20] Schema di decreto Legislativo recante disposizioni in materia di classificazione dei requisiti acustici degli edifici in attuazione della delega al governo per il riordino della disciplina in materia di inquinamento acustico di cui all'art. 11 della legge 7 Luglio 2009, n° 88

12. Indice Figure

Figura 1 – Tipologia di onde: longitudinale (superiore) trasversale (inferiore)	36
Figura 2 – Tipologie di interferenze	38
Figura 3 – Varie ampiezze dell'onda sonora	42
Figura 4 – Flussi di energia sonora in un divisorio rigido	48
Figura 5 - l'oscillatore armonico smorzato.....	52
Figura 6 - Andamento del potere fonoisolante di un divisorio in funzione della frequenza	55
Figura 7 - esempi di connessione: (a) a linea; (b) per punti.....	63
Figura 8 – Assorbimento acustico di diversi tipi di elementi assorbenti	70
Figura 9 – Materiali assorbenti con diverse superfici a contatto con l'onda sonora	72
Figura 10 – Lo spessore del materiale fonoassorbente in fibra di vetro (densità di 50 Kg/m ³) determina l'assorbimento a bassa frequenza. Il materiale è montato direttamente su una superficie rigida.....	73
Figura 11 – si può migliorare l'assorbimento a bassa frequenza di un pannello in fibra di vetro da un pollice, distanziandolo adeguatamente dalla parete.....	74
Figura 12 – la densità del materiale assorbente in fibra di vetro ha un effetto minimo sull'assorbimento nella gamma compresa fra 25 e 100 Kg/m ³ . Il materiale è montato direttamente su una parete solida.....	75
Figura 13 – Risuonatore di Helmholtz	
Figura 14 – Pannelli forati che sfruttano il principio del.....	76
Figura 15 – Andamento tipico del coefficiente di assorbimento associato ad un risonatore di Helmholtz nudo o rivestito di materiale assorbente.	78
Figura 16 - pannello sottile di massa m per unità di area, disposto ad una distanza d da una superficie rigida, con materiale assorbente nell'intercapedine.....	78
Figura 17 – Sistema fonoassorbente semplice.....	80
Figura 18 – Sistema fonoassorbente con materiale poroso	80
Figura 19 - Foto stato attuale Edificio 2	

Figura 20 – Foto storica degli edifici affacciati su piazzale Leonardo da Vinci (fine anni '30).....	119
Figura 21 - Foto storica aerea del Campus Leonardo (fine anni 30).....	119
Figura 22 - Foto stato attuale da piazzale Leonardo da Vinci	120
Figura 23 - Edificio 2, foto facciate rivolte rispettivamente a est e nord.....	121
Figura 24 Pianta edificio 2 tratta dal progetto originale; foto storiche di un 'aula da disegno (in alto a destra) e della mensa dei professori (in basso a destra) entrambe situate nell'edificio 2.....	122
Figura 25 - foto del progetto del piano soppalco (anni 80); foto recente di un'aula (a destra).....	123
Figura 26 – Foto da progetto esecutivo de solaio di divisione del piano terra con particolari esecutivi della struttura portante (1987).....	123
Figura 27 - Progetto esecutivo del nodo tra solaio e infissi (prima ipotesi studiata nel 1991)	124
Figura 28 - Progetto esecutivo per la realizzazione di un doppio serramento mai realizzato (Progetto 1990)	125
Figura 29 - Foto del profilo ad "L" della soluzione realizzata a fine anni 90	126
Figura 30 - Foto interne della parte meridionale soggetta all'intervento di modifica nel 2004	127
Figura 31 - Foto dal piano soppalco del particolare modificato nel 2004	127
Figura 32 - Foto esterna dell'edificio interessato	
Figura 33 - Particolare tecnico della muratura.....	128
Figura 34 - Vista aerea verso ovest Figura 35 - Vista aerea verso nord.....	128
Figura 36 – Archi e volte presenti ai piani inferiori.....	129
Figura 37 – Foto degli infissi attualmente installati.....	130
Figura 38 - Foto tipologia di fonometro	
Figura 39 – Foto di movimentazione manuale del fonometro.....	148
Figura 40 - Generatore a cassa monodirezionale	
Figura 41 – Installazione di un generatore a cassa monodirezionale.....	148
Figura 42 - Generatore a dodecaedro	
Figura 43 – Supporto di amplificazione (foto del rilievo svolto).....	149
Figura 44 - software e supporto di ricezione dati	

Figura 45 - software di ricezione dati e prima elaborazione utilizzato nel rilievo svolto.....	149
Figura 46 - Generatore di rumore da calpestio	150
Figura 47 - immagine rappresentativa di varie sorgenti di inquinamento acustico.....	151
Figura 48 - Foto da rilievo acustico svolto: locali svuotati da utenze e arredi	152
Figura 49 - Foto da rilievo acustico svolto: locali occupati da utenze e arredi	153
Figura 50 - Ritaglio Pianta Piano Terra edificio 2 con segnalazione della zona interessata dal rilievo.....	154
Figura 51 - Ritaglio Pianta Piano Soppalco edificio 2 con segnalazione della zona interessata dal rilievo	154
Figura 52 - Ingrandimento della zona interessa Pianta Piano Terra.....	155
Figura 53 – Ingrandimento zona interessata Pianta Piano Soppalco	155
Figura 54 - Ritaglio Pianta Piano Terra edificio 2 con segnalazione della zona interessata dal rilievo.....	156
Figura 55 - Ritaglio Pianta Piano Soppalco edificio 2 con segnalazione della zona interessata dal rilievo	156
Figura 56 - Ingrandimento zona interessata Pianta Piano Terra.....	157
Figura 57 - Ingrandimento zona interessata Pianta Piano Soppalco	157
Figura 58 - Foto da rilievo svolto: operatore con fonometro pronto al rilievo a scansione manuale.....	158
Figura 59 - Foto del rilievo svolto, operatore pronto al rilievo del tempo di riverbero	160
Figura 60 - Foto da rilievo svolto: Strumentazione in posizione	161
Figura 61 - Foto del rilievo svolto, percorso a scansione manuale svolto dall'operatore	163
Figura 62 - Pianta Piano Terra con indicazione dei due interventi.....	171
Figura 63 - Particolare esecutivo presente nel Progetto del 2004	172
Figura 64 - Foto dell'impianto incassato nella soluzione interessata (Piano Soppalco)	173
Figura 65 - Foto dal Piano Terra della soluzione interessata	174
Figura 66 - Foto della battuta della soluzione sull'infixo(a sinistra) ; foto del materiale effettivamente presente nella parte superiore dell'infixo (a destra)	175
Figura 67 - Foto della soluzione nella parte nord con diverso materiale (in basso a destra)	175
Figura 68 - Disegno dello stato di fatto successivo alla prima sistemazione (parte a nord).....	176
Figura 69 - Disegno dello stato di fatto successivo alla seconda sistemazione (parte a sud).....	177

Figura 70 - Estratto dal progetto della soluzione 1-A	178
Figura 71 - Estratto dal progetto della soluzione 1-B	180
Figura 72 - Estratto dal progetto della soluzione 2.....	182
Figura 73 – Esploso di un pannello ISOPHON LIGHT.....	184
Figura 74 - Soluzione 1-A : ingrandimento dalla parte orizzontale	198
Figura 75 - Varie forme e soluzioni di guarnizione in neoprene	199
Figura 76 - Tipo di supporto	200
Figura 77 - Foto tipo di un pannello ligneo multistrato	200
Figura 78 - Foto da catalogo della fibra di poliestere AKUSTIK	201
Figura 79 - Soluzione 1-A : ingrandimento della parte verticale	202
Figura 80 - Pannelli di cartongesso a doppia lastra	203
Figura 81 - immagine da catalogo foglio in sugherogomma.....	203
Figura 82 – Soluzione 1-B , ingrandimento della parte orizzontale.....	204
Figura 83 – Immagine da scheda tecnica, pendini CDM CCO.....	205
Figura 84 – Estratto dal progetto, ingrandimento della soluzione 2.....	206

13. Indice tabelle

Tabella 1 – Potere fonoisolante di alcune strutture di uso comune in edilizia	58
Tabella 2 - Valori tipici del prodotto fcd a 20 °C.....	67
Tabella 3 – Proprietà e principali applicazioni di alcuni tipi di materiali e strutture assorbenti.....	81
Tabella 4 – tabella di riferimento per il calcolo dell'incremento del potere fonoisolante ΔR_w	87
Tabella 5 – Allegato A del D.P.C.M. 5/12/1997, definizione delle grandezze acustiche.....	98
Tabella 6 – Classificazione degli ambienti abitativi (Art.2).....	101
Tabella 7 – Requisiti acustici passivi degli edifici, dei loro componenti e degli impianti tecnologici (Art.3).....	102
Tabella 8 – Classificazione acustica di unità immobiliari in funzioni dei requisiti prestazionali	109
Tabella 9 – Classificazione acustica di unità immobiliari in funzione di ulteriori requisiti prestazionali da applicare in caso di destinazione d'uso ricettiva	110
Tabella 10 – Valori di riferimento minimi per l'isolamento di facciata in riferimento alla classificazione acustica territoriale.....	110
Tabella 11 – Requisiti per l'isolamento acustico normalizzato rispetto ad ambienti di uso comune o collettivo dell'edificio collegati mediante accessi o aperture ad ambienti abitativi	111
Tabella 12 – Elenco lavorazioni riferite alla soluzione 1-A.....	187
Tabella 13 - Materiali utilizzati e relativi costi riferiti alla soluzione 1-A	188
Tabella 14 – Elenco delle lavorazioni riferite alla soluzione 1-B	189
Tabella 15 - Materiali utilizzati e relativi costi riferiti alla soluzione 1-B	190
Tabella 16 – Elenco delle lavorazioni riferite alla soluzione 2.....	191
Tabella 17 - Materiali utilizzati e relativi costi riferiti alla soluzione 2.....	192
Tabella 18 - Elenco delle lavorazioni e relativi tempi di lavorazione riferiti alla soluzione 1-A	194
Tabella 19 - Elenco delle lavorazioni e relativi tempi di lavorazione riferiti alla soluzione 1-B	195
Tabella 20 - Elenco delle lavorazioni e relativi tempi di lavorazione riferiti alla soluzione 2.....	196
Tabella 21 – Tabella valutazione soluzioni tecniche senza pesi	210
Tabella 22 – Tabella di valutazione soluzione tecnica con i rispettivi pesi assegnati.....	210

14. Indice grafici

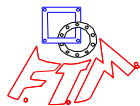
Grafico 1 - Successione delle fasi nel processo edilizio.....	19
Grafico 2 - Risultati del rilievo nella prima fase (tra locali adiacenti)	167
Grafico 3 - Risultati del rilievo nella prima fase (Piano Terra e Piano Soppalco)	168
Grafico 4 - Risultati del rilievo nella seconda fase (Piano soppalco e Piano terra).....	169

15. Indice Allegati

Allegato I – Scheda tecnica guarnizione in neoprene.....	223
Allegato II – Scheda tecnica supporti elastici Consonica CSC wood strips.....	224
Allegato III – Scheda tecnica pannello ligneo multistrato.....	225
Allegato IV – Scheda tecnica fibra di poliestere.....	227
Allegato V – Scheda tecnica lastra in cartongesso.....	229
Allegato VI – Foglio smorzante in sugherogomma.....	230
Allegato VII – Pendini CDM CCO.....	231
Allegato VIII – Localizzazione area di intervento	232
Allegato IX – Pianta piano terra edificio nord Politecnico di Milano.....	233
Allegato X – Pianta piano soppalco edificio nord Politecnico di Milano.....	234
Allegato XI – Pianta piano terra e soppalco demolizioni/costruzioni.....	235
Allegato XII – Particolare stato di fatto soluzione 1- A.....	236
Allegato XIII – Particolare stato di progetto soluzione 1- A.....	237
Allegato XIV – Particolare stato di fatto soluzione 1- B.....	238
Allegato XV – Particolare stato di progetto soluzione 1- B.....	239
Allegato XVI – Particolare stato di progetto soluzione 2.....	240

ALLEGATO I

Scheda tecnica: GUARNIZIONE IN NEOPRENE



F.T.M. di Marchetti Roberto

PRODUZIONE GUARNIZIONI INDUSTRIALI

Via Europa 13 – 25040 Monticelli Brusati (BS)

Scheda Tecnica

GOMMA NEOPRENE

Gomma con contenuto di neoprene pari ad un 30%. Discreta resistenza all'ozono, agli agenti atmosferici ed all'invecchiamento, discreta resistenza agli olii minerali e vegetali. Discreta resistenza all'acqua di mare. Buona resistenza ai solventi ed acidi a bassa concentrazione. Adatta quando vengono richieste diverse ma concomitanti esigenze.

PROPRIETA'	VALORI
Tipo di gomma	Neoprene
Colore	Nero
Peso specifico	1,40 grs/cm ³
Durezza	70 ± 5 Shore A
Carico di rottura	50 kg/cm ²
Allungamento	250%
Compression set (22 ore a 70°C) :	40%
Resistenza allo strappo	15 kg/cm
Agenti termici (72 ore a 70°C)	
- Durezza	4 shore A
- Carico di rottura	- 6%
- Allungamento	- 18%
Resistenza chimica	
- Ozono	sufficiente
- Acidi diluiti e basi	sufficiente
- Acidi concentrati e basi	buona
- Idrocarburi	insufficiente
- solventi	insufficiente
Temperatura :	- 20 / + 100 °C

ALLEGATO II

Scheda tecnica: SUPPORTI ELASTICI CONSONICA CSC WOOD STRIPS



TECHNICAL DATA SHEET

Printing 07/11/2013

Trade name: CSC WOOD STRIPS

page 1/1

CSC WOOD STRIPS

Tipologia	Strisce di legno multistrato di pino fenolico, con supporti elastici incollati con colla poliuretanaica.
Densità Elastomero ±5%	Approx. 650 kg/m ³
Colore	Nero-Grigio
Materiale	Gomma riciclata, lattice, PU legante.
Resistenza alla trazione (DIN 53455)	>0.75 N/mm ²
Cedimento alla compressione	5% a 0.05 N/mm ² 10% a 0.1 N/mm ²
Resistenza alla compressione (DIN 53421)	0.5 N/mm ²
Range di temperatura in cond. Standard	da -30° C a +70° C
Conduttività termica (EN 12667)	λ= 0.11 W/(m.K.)
Comportamento al fuoco (EN 13501)	E _n (n.i.; B2)
Comportamento chimico	Resistente ad acqua, numerosi acidi diluiti e soluzioni alcaline; chimicamente neutro, resistente ai raggi UV.
Rigidità dinamica reale	s = 13 MN/m ³ con spessore 20 mm

CONSONICA S.R.L. UNIPERSONALE CAP. SOC. 10.000,00 I.V.
SEDE LEGALE: VIA CAVOUR, 14 - 20851 LISSONE (MB)
C.FISC.-P.IVA E REG. IMPRESE MB 06979860969 - R.E.A. MB 1870724
EMAIL CONSONICA@CONSONICA.IT - WWW.CONSONICA.IT
TEL. 039/21.83.736 - FAX 039/46.55.570

Scheda tecnica: PANNELLO LIGNEO MULTISTRATI

Compensato Okoumè FSC®

Il compensato marino Okoumè è la soluzione ideale per applicazioni in ambito navale e per usi esterni.



Vantaggi

Il Compensato okoumè FSC® puro si distingue per:

- Ottima durabilità in ambienti con alto grado di umidità e salinità
- Peso contenuto ed elevate caratteristiche meccaniche
- Stabilità dimensionale, planarità ottimale
- Facile lavorabilità



BS 1088

A cosa serve

Questo pannello trova un larghissimo uso a bordo delle imbarcazioni da diporto, dalla compartimentazione interna, ai paglioli, ai mobili, alle sovrastrutture. E' il prodotto ideale per importanti lavori d'esterno, in particolare nei casi di esposizione prolungata alle intemperie e all'acqua.



Com'è composto

Compensato marino composto interamente da strati di derollato di Okoumè a struttura omogenea, con incollaggio melaminico. Proviene dal Gabon, da foreste controllate e perenni ed è certificato 100% FSC®. Di qualità II/III (B/BB) è un prodotto omogeneo e durevole, resistente e stabile ed assicura una planarità ottimale.

Altri dettagli

I pannelli sono prodotti in conformità alle norme AFNOR e certificati dal CTBX francese e conformi allo **Standard Inglese B.S. 1088** (Boil and Weather Proof). Hanno conseguito la marcatura CE per impiego strutturale in ambiente esterno, secondo la norma EN 13896.



Incollaggio
EN 314.2

Classe
3-E1

SPESSORE (mm)	STRATI (n°)	PESO (Kg/m ²)
<i>EN 315</i>		
3	3	1,4
4	3	1,9
5	3	2,4
6	3	2,8
6	5	2,8
8	5	3,8
10	5	4,8
12	7	5,8
15	7	7,2
18	9	8,6
19	9	9,1
20	9	9,6
22	11	10,5
25	11	12,0
30	13	14,4
40	17	19,2



CONDUTTIVITA' TERMICA
UNI 7745

} 0,12 W/mK

RESISTENZA ALLA FLESSIONE
(MPa)

MODULO ELASTICO
(MPa)

long.

trasv.

long.

trasv.

43

30

6400

3600

40

27

5800

3300

EN 310

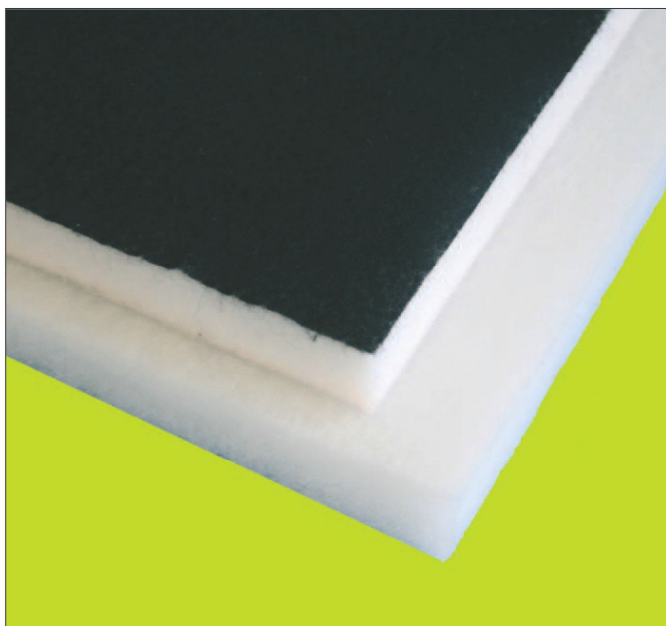


DIMENSIONI STANDARD
EN 315



2500 x 1220 mm
2500 x 1530 mm
3100 x 1530 mm
3100 x 1830 mm

AKUSTIK[®] - SOFT



IL MATERIALE IN
FIBRA DI POLIESTERE,
IGNIFUGO,
PER L'ISOLAMENTO
TERMOACUSTICO

MATERIALE

L'Akustik[®]-Soft è la fibra di poliestere pura al 100% di colore bianco latte. L'Akustik[®]-Soft è inodore, atossico e non crea alcun problema a contatto con l'epidermide; non è pulvisulento e non degrada, mantiene le sue caratteristiche inalterate nel tempo ed è inoltre riciclabile. L'Akustik[®]-Soft è CL1 di reazione al fuoco e i fumi sono atossici. L'Akustik[®]-Soft può essere accoppiato con TNT nero, Alluminio o con masse fonoisolanti come piombo o gommapiombo.

DIMENSIONI STANDARD

Rotoli con h600 o h1200
Pannelli 590*590
1200*600
2000*1000
Spessori:
da 10 a 60 mm.
Densità:
da 10 a 60 Kg/mc.
Ogni altra dimensione o densità è realizzabile a richiesta. Tolleranze dimensionali a norma DIN 7715 Parte 2.

COMPORTAMENTO AL FUOCO

Classe 1.

CAMPI DI APPLICAZIONE

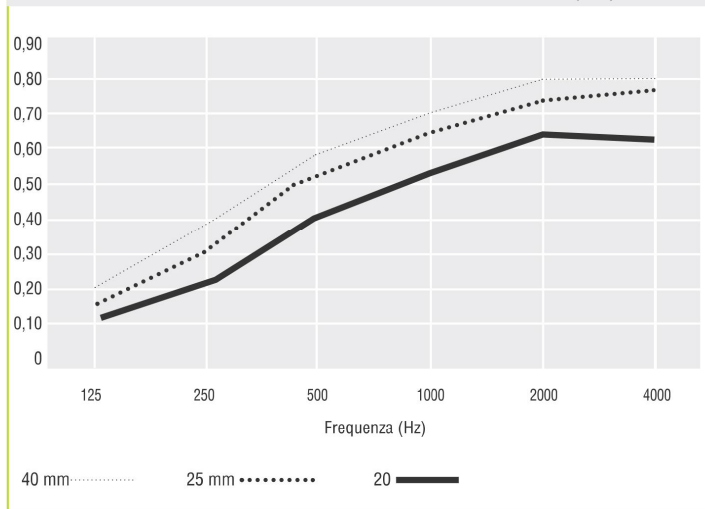
L'Akustik®-Soft trova largo utilizzo quale materassino per l'isolamento termico e acustico sopra i controsoffitti di ogni genere (cartongesso, doghe, fibra minerale, gesso alleggerito, metallici ecc.); nelle intercapedini di tramezzature e contropareti in cartongesso o in muratura, all'interno di pareti mobili ecc. L'Akustik®-Soft trova inoltre largo utilizzo nell'industria ferroviaria, automobilistica e nell'insonorizzazione industriale.

MESSA IN OPERA

L'Akustik®-Soft può essere sagomato mediante una taglierina o una forbice lunga.

L'Akustik®-Soft viene applicato a posa libera nelle intercapedini, in appoggio sopra i controsoffitti o incollato a pareti e soffitti di qualsiasi natura.

Grado di assorbimento acustico secondo ISO 354 (α_S)



CARATTERISTICHE FISICHE

- Spessori: 15, 20, 37 mm
- Densità: 55 Kg/m³, 30 Kg/m³, 15 Kg/m³
- Valore di conducibilità termica: Secondo UNI 7745
0,040 Kcal/hm° C
0,045 Kcal/hm° C
0,050 Kcal/hm° C



ALLEGATO V

Scheda tecnica: Lastra in cartongesso



Lastre in gesso rivestito Knauf GKB (A)

Prodotto, Caratteristiche, Certificazione

Prodotto	Caratteristiche	Certificazione
<p>Denominazione commerciale Lastra GKB (A)</p> <p>Descrizione Lastre in gesso rivestito costituite da un nucleo di gesso le cui superfici e bordi longitudinali sono rivestiti di speciale cartone perfettamente aderente, utilizzabili in tutte le tipologie edilizie per finiture d'interni.</p> <p>Composizione del nucleo della lastra CaSO₄ x 2 H₂O</p>	<p>Spessore: 9,5 - 12,5 - 15 - 18 mm</p> <p>Larghezza: 1200 mm</p> <p>Peso: 7,8 - 9,5 - 12,5 - 15 kg/m²</p> <p>Densità: 760 kg/m³ circa</p> <p>Bordo: AK</p> <p>Identificazione: Timbro di colore blu</p> <p>Classe di reazione al fuoco: A2-s1,d0 (B)</p> <p>Conduttività termica λ: 0,20 W/mK</p> <p>Permeabilità al vapore acqueo (EN 10465-2008): 10</p> <p>Impiego: Pareti, contropareti e controsoffitti interni</p>	<p>Dati per la certificazione LEED</p> <p>Il prodotto è recuperato, rinnovato o riusato? NO</p> <p>Contiene contenuto riciclato? SI</p> <p>Post consumo: 1%</p> <p>Post produzione: NO</p> <p>Prodotto a: Castellina Marittima (PI) - Italia</p> <p>Materie prime estratte a: Castellina Marittima (PI) - Italia</p> <p>Contiene materiali rapidamente rinnovabili? SI</p>

www.knauf.it knauf@knauf.it	<p>Sede: Castellina Marittima (PI) Tel. 050 69211 Fax 050 692301</p>	<p>Stabilimento Sistemi a Secco: Castellina Marittima (PI) Tel. 050 69211 Fax 050 692301</p>	<p>Stabilimento Sistemi Intonaci: Gambassi Terme (FI) Tel. 0571 6307 Fax 0571 678014</p>	<p>K-Centri: Knauf Milano Rozzano (MI) Tel. 02 52823711</p>	<p>Knauf Padova Padova (PD) Tel. 049 7165011</p>	<p>Knauf Pisa Castellina Marittima (PI) Tel. 050 69211</p>	<p>Knauf Roma Roma (RM) Tel. 06 32099911</p>
--	--	--	--	---	--	--	--

Tutti i diritti sono riservati ed oggetto di protezione industriale. Le modifiche dei prodotti illustrati, anche se parziali, potranno essere eseguite soltanto se esplicitamente autorizzate dalla società Knauf s.a.s. di Castellina Marittima (PI). Tutti i dati forniti ed illustrati sono indicativi e la società Knauf s.a.s. si riserva di apportare in ogni momento le modifiche che riterrà opportune, in conseguenza delle proprie necessità aziendali e dei procedimenti produttivi.

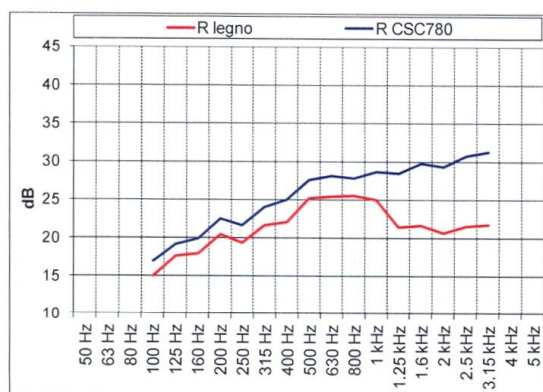
ALLEGATO VI

Scheda tecnica: foglio smorzante in sugherogomma CONSONICA CSC780



CSC 780
DATA SHEET

DENSITÀ	APPROX. 780 KG/M ³
COLORE	NERO
MATERIALE	GOMMA, SUGHERO, PU LEGANTE
RESISTENZA ALLA TRAZIONE (DIN 53455)	>0.75 N/MM ²
RESISTENZA ALLA COMPRESIONE (DIN 53421)	0.15 N/MM ²
RANGE DI TEMPERATURA IN COND. STANDARD	-30° C TO +80° C
COEFFICIENTE TERMICO DI DILATAZIONE (DIN 53752 23.1)	10-5/°C +3.4%
CONDUTTIVITÀ TERMICA (EN 12667)	0.17 W/(MK)
COMPORTAMENTO AL FUOCO (EN 13501)	E _N (N.I.; B2)
COMPORTAMENTO CHIMICO	RESISTENTE AD ACQUA, NUMEROSI ACIDI DILUITI E SOLUZIONI ALCALINE; CHIMICAMENTE NEUTRO, RESISTENTE AI RAGGI UV
INDICE DI VALUTAZIONE DEL POTERE FONDOISOLANTE (R) (ISO 140 - ISO 717)	29 DB*



* IL GRAFICO QUI A LATO PRESENTA I VALORI DI POTERE FONDO ISOLANTE (R) PER SINGOLE BANDE DI 1/3 DI OTTAVA A CONFRONTO CON QUELLI DI UN PANNELLO DI LEGNO DI PARI SPESSORE

CONSONICA S.R.L. UNIPERSONALE CAP. SOC. 10.000,00 I.V.
SEDE LEGALE: VIA CAVOUR, 14 - 20851 LISSONE (MB)
C.FISC.-P.IVA E REG. IMPRESE MB 06979860969 - R.E.A. MB 1870724
EMAIL CONSONICA@CONSONICA.IT - WWW.CONSONICA.IT
TEL. 039/21.83.736 - FAX 039/46.55.570

ALLEGATO VII

Scheda tecnica: Pendini modello CDM-CCO



CDM-CCO
Suspended Ceiling Hanger

CDM-CCO is a Suspended Ceiling Hanger designed to isolate a standard ceiling channel therefore optimising sound insulation between vertically stacked rooms.

System features:

- Cost effective
- Quick and easy to install
- Hangers can be ordered in two different stiffnesses:

CDM-CCO-L	20-40lb per hanger
CDM-CCO-H	40-100lb per hanger
- Intergrated failsafe easily engaged - as shown
- System comes optionally with perimeter isolation strip to isolate the perimeter of the ceiling from the surrounding structures

To specify which CDM-QRC hangers you require CDM's engineers will need the following information:

- The weight and construction of the supported ceiling - this will determine the type of hanger
- The required void between the supporting soffit and the suspended ceiling

