Università Politecnica delle Marche
Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

---

# *Calcolo del comfort acustico degli edifici integrato al Building Information Model*

# *Calculation of the acoustic comfort of buildings integrated to the Building Information Model*

Tesi di laurea di:
**Appolloni Nicolò**

Relatore:
**Prof. Gian Marco Revel**

Correlatore:
**Prof. Milena Martarelli**

A.A.: 2020/2021

# Estratto

Il comfort degli occupanti è uno degli aspetti principali da considerare nella progettazione e ristrutturazione degli edifici. L'ambiente interno, infatti, incide notevolmente sulla salute e sulla produttività lavorativa. Il comfort dell'ambiente interno è un concetto molto ampio poiché riguarda molteplici aspetti, come il comfort acustico, termico e visivo. In particolare, il comfort acustico è un argomento complesso a causa della sua dipendenza da variabili sia fisiche che fisiologiche. Nonostante sia un concetto importante, il comfort acustico è un aspetto spesso sottovalutato nella riqualificazione degli edifici esistenti.

In questa tesi si applicherà un metodo per la stima del confort acustico legato alle prestazioni dell'involucro, ovvero della facciata dell'edificio, sviluppato dal Gruppo di Misure Meccaniche e Termiche del DIISM. Questo metodo è anche chiamato soft-sensor perché permette di calcolare il rumore interno di un edificio utilizzando come dati in input dati sperimentali, simulati, o ipotizzati e soggettivi, correlati al livello di rumore esterno circostante e alle prestazioni acustiche dell'involucro edilizio. In particolare, il comfort acustico viene valutato sulla base dei livelli di pressione sonora equivalenti all'interno dell'abitazione. Il sistema di valutazione è rappresentato da un Key Performance Indicator (KPI), che esprime il comfort acustico, rendendo possibile il rapido confronto tra diversi edifici esistenti. Il Key Performance Indicator funziona, quindi, come strumento di supporto alla progettazione e alle decisioni, fornendo al progettista un feedback rapido e chiaro sulle prestazioni raggiunte e, inoltre, può essere confrontato per identificare la migliore opzione di ristrutturazione. Il metodo è stato applicato inizialmente su due casi di studio semplificati per verificarne le funzionalità.

La seconda parte della tesi si focalizza sull'integrazione della procedura di calcolo del comfort acustico con il Building Information Model (BIM) di un edificio reale. La procedura generale di calcolo del comfort acustico, descritta nel capitolo 3, non risulta essere pratica nel caso specifico in cui i dati vengano reperiti direttamente dal modello BIM dell'edificio. Infatti nei modelli BIM degli edifici, soprattutto riferiti ad edifici esistenti e da riqualificare, mancano diverse informazioni tra le quali, principalmente, il potere fonoisolante dei vari elementi di facciata. Risulta quindi necessario sviluppare una procedura ad "hoc" per questa applicazione specifica.

Sono state, quindi, eseguite alcune modifiche nei dati di input richiesti dal modulo di

calcolo originale, con l'obiettivo, appunto, di facilitare l'integrazione di questo con i BIM degli edifici. Inoltre, sempre allo scopo di perseguire l'idea del BIM, cioè di rendere più snello e ottimale il progetto lungo l'intero ciclo di vita di un edificio, è stato realizzato un involucro software al modulo di calcolo, così che il formato con cui inviare i dati al server sia il più user-friendly possibile e nello specifico è stato utilizzato il JSON. Questo perché i file CSV, formato su cui si basava la procedura generale, sono di difficile gestione e interpretazione. Inoltre rispetto alla procedura generale ora il modulo di calcolo è eseguibile tramite un qualsiasi clientweb file locale. E' stato realizzato un caso di studio di un intero edificio, di cui era disponibile il modello BIM, per verificare l'applicabilità e l'affidabilità della nuova procedura sviluppata ed evidenziarne le problematiche. La principale problematica come vedremo è dovuta al fatto che nel BIM dell'edificio studiato non è inserita la proprietà della stratigrafia dell'involucro relativa alla densità dei materiali.
In conclusione è stata effettuata una valutazione dell'affidabilità della procedura sviluppata mediante una analisi di incertezza e di sensibilità all'incertezza dei diversi input.

**CAPITOLO 1** ..... **9**

**INTRODUZIONE** ..... **9**

1.1 IL COMFORT ACUSTICO IN AMBIENTE INDOOR ..... 9
1.2 IL DESIGN ACUSTICO DEGLI EDIFICI ..... 11

**CAPITOLO 2** ..... **13**

**TEORIA DI BASE DI ACUSTICA DI EDIFICI** ..... **13**

2.1 IL SUONO E LA SCALA IN DECIBEL ..... 13
2.2 I MECCANISMI DI TRASMISSIONE DEL SUONO ALL'INTERNO DEGLI EDIFICI ..... 14
2.3 IL POTERE FONOISOLANTE ..... 15
2.4 CALCOLO DEL POTERE FONOISOLANTE E DELL'ABBATTIMENTO ACUSTICO ..... 16
2.5 MODELLO ANALITICO PER LA STIMA DEL POTERE FONOISOLANTE PONDERATO DEGLI ELEMENTI ..... 19
2.6 MODELLO ANALITICO PER LA STIMA DELL'INCREMENTO DEL POTERE FONOISOLANTE PONDERATO IN PRESENZA DI UNO STRATO AGGIUNTIVO ..... 19
2.7 STIMA DEL TEMPO DI RIVERBERO ..... 20
2.8 STIMA DEL LIVELLO DI PRESSIONE SONORA INTERNA ..... 21

**CAPITOLO 3** ..... **23**

**MODELLO PER IL CALCOLO DEL COMFORT ACUSTICO** ..... **23**

3.1 ARCHITETTURA DEL CODICE ..... 23
3.2 *METODOLOGIA DI CALCOLO DEL KPI OGGETTIVO* ..... 24
3.3 MODELLO DI CALCOLO PER SUPPORTARE IL PROCESSO DECISIONALE NEGLI INTERVENTI DI RISTRUTTURAZIONE ..... 26
3.4 PROCESSO DI RACCOLTA E MEMORIZZAZIONE DEI DATI PER ESEGUIRE IL MODULO ACUSTICO ..... 27
3.5 LE SIMULAZIONI DI COMFORT ACUSTICO ..... 31
3.6 CASI DI STUDIO ..... 33
3.6.1 STANZA UNIVPM ..... 33
3.6.2 AULA DI UNA SCUOLA MATERNA DI GENOVA ..... 36

**CAPITOLO 4** ..... **39**

**INTEGRAZIONE DEL MODULO PER IL CALCOLO DEL COMFORT ACUSTICO CON IL BUILDING INFORMATION MODEL** ..... **39**

4.1 IL BUILDING INFORMATION MODEL ..... 39
4.2 *INTEGRAZIONE DEL MODULO ACUSTICO CON IL MODELLO BIM DEGLI EDIFICI* ..... 40
4.2.1 INTERFACCIA MODULO DI CALCOLO ..... 40
4.2.2 STRUTTURA DEI DATI DI INPUT ..... 42

**CAPITOLO 5** ..... **45**

**CASO DI STUDIO: EDIFICIO POPOLARE IN MASSY (FRANCIA)** ..... **45**

5.1 DESCRIZIONE DELL'EDIFICIO ..... 46
5.2 DETERMINAZIONE DEL LIVELLO DI RUMORE ESTERNO ..... 52
5.3 ELEMENTI COSTRUTTIVI ..... 53
5.4 COMFORT ACUSTICO DELL'EDIFICIO ..... 58

**CAPITOLO 6** ..... **61**

**ANALISI DI SENSIBILITA' E INCERTEZZA** ..... **61**

6.1 ANALISI DI SENSIBILITA' E METODO MONTE CARLO ..... 61

6.2 APPLICAZIONE METODO MONTE CARLO AL CASO DI STUDIO DI MASSY ..... 63
6.3 ANALISI DI INCERTEZZA DEL CASO DI STUDIO DI MASSY ..... 68
**CAPITOLO 7 ..... 70**
**CONCLUSIONI ..... 70**

# CAPITOLO 1: INTRODUZIONE

## 1.1 Il comfort acustico in ambiente indoor

Lo scopo principale di un edificio è fornire un ambiente sano e confortevole per gli occupanti, poiché le persone trascorrono circa il 90% della giornata all'interno degli edifici [1], [2], [3]. In Europa, oltre il 70% del patrimonio edilizio esistente è stato costruito prima degli anni '70, quando c'era una crescente necessità di costruire abitazioni a basso costo nelle aree urbane e le norme e gli standard edilizi erano molto limitati [4]. Pertanto, la maggior parte degli edifici esistenti richiede interventi di ristrutturazione per migliorare e garantire la resistenza strutturale, l'efficienza energetica e l'elevata qualità degli spazi interni, inclusa, ad esempio, la protezione dal rumore [5].

Un fattore chiave per il raggiungimento di ambienti salubri negli edifici è la fornitura di un elevato livello di Indoor Environment Quality (IEQ) [6] - [7]. IEQ è considerato un indicatore del livello di comfort ambientale, identificato con il benessere delle persone che vivono in un determinato ambiente, che include elementi come il comfort termico e visivo, la qualità dell'aria interna ma anche il comfort acustico [8], con quest'ultimo elemento che spesso è stato trascurato nella progettazione.

Quello del comfort acustico è un tema abbastanza delicato e controverso poiché, dal punto di vista legislativo, non abbiamo una regolamentazione tale che permetta di gestire l'argomento nella maniera opportuna [12]. Il comfort acustico degli edifici, infatti, non è rappresentato da un'unica grandezza fisica, misurabile direttamente, ma dipende dalla combinazione di diverse variabili fisiche, oltre che da parametri soggettivi, che dipendono dalla percezione e dalla sensibilità umana. Pertanto, non può essere misurato per mezzo di uno strumento di misura "diretto". Può essere valutato indirettamente attraverso la misurazione diretta di alcune variabili, le ipotesi di altre difficili da misurare, e anche la simulazione di altri dati, che tengono conto essi stessi di dati misurati, simulati e assunti.

Il comfort acustico può essere definito come quella condizione psicofisica per cui un individuo, immerso in un campo sonoro, si trova in condizioni di benessere, in relazione all'attività che sta svolgendo. Quindi il comfort acustico di un edificio è assicurato se gli occupanti non sono infastiditi da rumori indesiderati che possono interferire con la loro comunicazione, disturbare il sonno, o nei casi più gravi essere causa di malattie [23]. Possiamo dire che il comfort acustico risulta essere assimilabile al concetto di benessere acustico, ma solo parzialmente sovrapponibile ai più basilari concetti di silenzio ed assenza di rumore, con cui viene spesso confuso. Questo aspetto è sperimentabile nella quotidianità, ad esempio quando ci troviamo in un ristorante totalmente vuoto, dove il totale silenzio non viene vissuto come condizione di reale benessere acustico ma bensì di disagio. Bisogna inoltre dire che non è solo il livello di rumorosità generale di un ambiente a creare le condizioni di comfort o discomfort acustico, ma che è necessario valutare con attenzione anche le caratteristiche "spettrali" del suono stesso, considerando come fortemente disturbanti le componenti sonore con prevalenza di frequenze troppo alte o troppo basse.

Si capisce quindi come sia importante considerare anche gli aspetti legati al comfort acustico durante la progettazione di un edificio o, caso assai più frequente, nel corso di interventi di miglioria acustica, nei confronti dei rumori provenienti dall'esterno, ma anche da quelli provenienti da appartamenti contigui. Una progettazione poco accurata e/o la realizzazione di un isolamento acustico insufficiente possono determinare discomfort acustico e, in alcuni casi gravi, un deficit al sistema uditivo o problemi al sistema della fonazione, fino ad effetti extra-uditivi con disturbi ai sistemi respiratorio e circolatorio [55]. Inoltre, una progettazione poco accurata può causare un eccessivo riverbero, che rappresenta la principale causa di scarsa intelligibilità del parlato, ovvero la comprensibilità di un suono, di una conversazione, da parte di un ascoltatore [55]. Studi recenti hanno dimostrato che il comfort acustico è uno dei fattori più influenti sulla percezione e sul comportamento umano, che contribuisce in modo significativo alla regolazione del proprio benessere fisico e psicologico [9]. Il rumore è un inquinante che non può essere evitato nella vita quotidiana e spesso è una delle principali cause di insoddisfazione e disagio all'interno dell'ambiente di vita [10]. L'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) [11] ha definito il rumore come "suono indesiderato, inaspettato e sgradevole". Inoltre, l'OMS ha identificato un numero considerevole di effetti di livelli eccessivi di rumore negli ambienti di vita, inclusi fastidio, disturbi del sonno e irritabilità, e anche effetti a lungo termine sulla salute come malattie cardiovascolari, malattie cardiache, ipertensione e problemi psichiatrici. In questa ottica il comfort acustico diventa un'esigenza che con il tempo acquisirà sempre più importanza per il benessere abitativo, così come è già avvenuto per il comfort termico.

Ovviamente nella progettazione del comfort acustico all'interno di un edificio è importante considerare che i rumori non provengono solo dall'esterno, ma vi possono essere anche rumori interni l'abitazione. Si capisce bene quindi che, per eliminare gli inquinanti acustici di una casa non basta sostituire il vetro nella finestra [58].

Le fonti esterne sono generalmente costituite dal traffico veicolare e dall'eventuale presenza, in prossimità dell'edificio, di attività produttive industriali, ferrovie e aeroporti. Il rumore prodotto da tali fonti si propaga per via aerea e poi penetra all'interno dell'edificio attraverso il suo involucro [55].

Le fonti di rumore interne, possono essere presenti sia nell'ambiente oggetto di studio che provenire dalle unità limitrofe, dovuto ad errata disposizione degli spazi o basso isolamento tra gli spazi adiacenti; tali fonti sono:

- gli impianti (ascensori, montacarichi, l'impianto idraulico,…)
- gli elettrodomestici
- le apparecchiature radio-televisive
- rumori da impianto, cioè i rumori da calpestio.

Data l'importanza degli aspetti legati al comfort acustico sin dalla progettazione e data la mancanza di una procedura olistica per misurare il comfort acustico [14], [15], Livia Claudi nella sua tesi di dottorato "Sviluppo di una procedura di misura del comfort acustico degli edifici basata su soft-sensing" ha sviluppato un efficiente approccio soft-sensing per la misurazione del comfort acustico, che combina misurazioni sperimentali, modelli matematici, che tengono conto di misurazioni reali, simulazioni o dati presunti e dati soggettivi, fornendo in output una valutazione del comfort acustico. Tale procedura è descritta nel capitolo 3.

## 1.2 Il design acustico degli edifici

La qualità acustica di un edificio è rappresentata dalla sua capacità di “bloccare” i rumori provenienti dall'esterno e dall'interno dell'edificio stesso, ovvero dalla qualità dei suoi requisiti acustici passivi [56].
Ne deriva che l'approccio principale per proteggere gli utenti degli edifici dal trasferimento del rumore esterno in un ambiente interno è la progettazione di involucri edilizi ad alto isolamento acustico [16]. L’isolamento acustico rappresenta la capacità di un elemento edilizio di ridurre l’energia acustica che si propaga da un ambiente a un altro. Una semplice regola è che più un materiale è spesso o denso, migliori sono le sue prestazioni di isolamento acustico, in quanto sarà più difficile mettere in vibrazione l’elemento e le onde sonore semplicemente rimbalzano.

Tuttavia, in generale, la progettazione dell’involucro edilizio secondo l’isolamento acustico di facciata richiesto dalla normativa non è sempre adeguato ai fini del comfort acustico degli occupanti. Infatti, le varie normative determinano l’isolamento acustico minimo di facciata richiesto, in funzione di una mappatura del rumore esterno e non della reale esposizione al rumore di ogni singola facciata dell'edificio [17]. Ciò può portare a una progettazione dell'involucro edilizio non ottimizzata ai fini del comfort acustico degli occupanti [18], anche se i requisiti acustici rispettano i limiti imposti dalle normative. Può quindi succedere che una classe acustica non corrisponda alla qualità acustica percepita [19].
Un caso dimostrativo è fornito dalla normativa adottata in Italia, il DPCM 5-12-1997 [20], che impone il rispetto di determinati valori minimi dell’isolamento acustico di facciata ($D_{2m,nT,w}$), per la protezione dai rumori esterni. Di conseguenza la maggior parte degli interventi di ristrutturazione dell'involucro edilizio effettuati in Italia si basano sul raggiungimento dei valori minimi definiti dal DCPM e non tengono conto del contesto urbano [53]. Si comprende quindi che il rispetto dei limiti del Decreto non determina necessariamente una condizione di comfort acustico. Può infatti accadere che il rumore esterno davanti all'edificio sia così eccessivo da dover raggiungere un valore di isolamento acustico di facciata più elevato, pur rispettando i limiti imposti dal DCPM.
Pertanto, durante i progetti di miglioria acustica di un edificio, insieme alla necessità di rispettare i limiti imposti dal DCPM, è importante valutare il livello di rumore esterno di fronte ad ogni specifica facciata. Ciò può evitare sprechi di denaro dovuti a progetti di ristrutturazione inadeguati che non causano miglioramenti nel comfort acustico.
Inoltre, il comfort acustico è anche legato ai rumori prodotti all’interno degli ambienti abitativi. Ad esempio, in una camera da letto non si può trascurare il disturbo generato da impianti regolati o progettati male, quali l’impianto di ventilazione meccanica controllata (VMC) o una valvola termostatica che “fischia” sul termosifone.
Quindi al fine di garantire una miglioramento nel comfort acustico di un edificio, la progettazione dovrebbe basarsi sul rumore interno agli edifici. Dovrebbero, quindi, essere definiti dei limiti di rumore all'interno dell’ambiente di vita, espressi in termini di livello di pressione sonora equivalente, che, se superati, possono indurre condizioni di disturbo e disagio, e da tali soglie, progettare adeguati sistemi costruttivi [21].
Proprio per queste ragioni la procedura sviluppata da Livia Claudi valuta il comfort acustico sulla

base non delle prestazioni dell'involucro edilizio ma su quelli che sono i livelli del rumore che affliggono l'ambiente interno una volta che le caratteristiche dell'involucro edilizio e il livello di rumore esterno caratterizzante la zona acustica del sito dell'edificio sono note. Come detto la procedura sviluppata da Livia Claudi viene richiamata nel capitolo 3.

# CAPITOLO 2: TEORIA DI BASE DI ACUSTICA DI EDIFICI

Il metodo utilizzato in questa tesi per la stima oggettiva del comfort acustico, descritto in dettaglio nel capitolo 3, permette di effettuare analisi acustiche a partire dalla misura diretta o simulazione dei livelli di pressione sonora equivalenti ponderati ed espressi dall'unità di misura decibel o [dB (A)] all'interno degli ambienti abitativi. Il livello di pressione sonora all'interno di un locale di un edificio sarà correlato al rumore esterno che circonda l'edificio considerato e alle performances fonoisolanti dell'involucro dell'edificio. Quindi i livelli di pressione sonora equivalenti ponderati interni [dB (A)] possono essere o misurati direttamente sul campo, utilizzando sensori acustici, o simulati sulla base del livello di pressione sonora esterno, misurato o stimato, e dell'abbattimento acustico della facciata del locale.
In questo capitolo vengono brevemente descritte le equazioni secondo cui operano i modelli analitici, previsti dalla norma che definisce la procedura per la stima della performance acustica di elementi di edifici, mediante la determinazione del potere fonoisolante delle facciate [24].

## 2.1 Il suono e la scala in decibel

Il concetto di comfort acustico è strettamente connesso al concetto di livello sonoro, pertanto è necessario introdurlo.
In termini fisici, il suono è una perturbazione, di carattere oscillatorio (vibrazione meccanica, turbolenza aerodinamica, ecc.), generata da una sorgente sonora che, propagandosi in un mezzo elastico (aria, acqua, solido, ecc.), causa una variazione di pressione percepibile dall'orecchio umano [25]. Senza un mezzo elastico, la propagazione del suono non avviene.
La variazione di pressione, causata dalla propagazione di onde sonore, risulta essere molto minore rispetto alla pressione atmosferica e, inoltre, la sua entità può variare in un campo estremamente ampio, tipicamente da variazioni dell'ordine di $10^{-6}\ Pa$ a variazioni dell'ordine di $10^{3}\ Pa$ [56]. Per questo motivo, è necessario l'utilizzo di una scala logaritmica nella quale, al valore della grandezza in esame, si fa corrispondere dieci volte il logaritmo in base dieci del rapporto tra tale valore e un valore prefissato di riferimento. Pertanto, il segnale ottenuto deve essere convertito in un livello di pressione sonora, attraverso l'Eq.1:

$$L(t) = 10 \log \frac{p(t)^2}{p_{rif}^2} \quad [\text{dB}] \qquad \text{Eq.1}$$

dove $p(t)$ è il valore della pressione sonora all'istante $t$, mentre $p_{rif}$ è la pressione di riferimento nel mezzo, che nell'aria corrisponde a $p_{rif} = 20 \cdot 10^{-6}\ Pa$. Tale valore non è preso casualmente, infatti rappresenta la minima variazione di pressione sonora che l'orecchio umano può percepire a $1000\ Hz$.
Tuttavia, solitamente, quando vengono effettuate misure acustiche ci si concentra sulle caratteristiche di un campo sonoro in un determinato intervallo temporale [59]. Per questo motivo, viene definito il livello equivalente di pressione sonora, determinabile con l'Eq.2:

$$L_{eq} = 10\log[\tfrac{1}{T}\textstyle\int_0^T 10^{\frac{L(t)}{10}} dt] \quad [\text{dB}] \qquad \text{Eq.2}$$

## 2.2 I meccanismi di trasmissione del suono all'interno degli edifici

Come detto in precedenza il suono per diffondersi all'interno di un ambiente richiede la presenza di un mezzo elastico. Tale mezzo è rappresentato sia dall'aria che dagli elementi strutturali ad es. di un edificio, infatti, la trasmissione del suono all'interno di edifici avviene mediante due principali meccanismi di propagazione:

- Trasmissione per via aerea;
- Trasmissione per via strutturale.

Nel caso della trasmissione per via aerea, il mezzo di propagazione è l'aria e il suono si diffonde all'interno degli ambienti senza incontrare particolari impedimenti solidi. In particolare, il suono passa attraverso qualsiasi fessura o piccola apertura e si riflette senza significative riduzioni d'intensità su qualsiasi superficie dura. Nel caso della trasmissione per via strutturale, invece, la propagazione del suono, ad esempio il rumore da calpestio, avviene attraverso la struttura solida dell'edificio per mezzo di vibrazioni elastiche. La trasmissione strutturale si conclude quando la vibrazione raggiunge una struttura che, vibrando a contatto con l'aria, dà origine alla propagazione per via aerea.

Accade quando il suono è generato dall'impatto di un oggetto o di un'onda sonora contro un elemento dell'edificio. L'impatto provoca vibrazioni, le quali generano onde sonore. Per questo meccanismo di trasmissione, inoltre, si è soliti parlare di trasmissione diretta e di trasmissione indiretta o fiancheggiante. In particolare, la trasmissione diretta avviene quando la trasmissione dell'energia sonora nell'ambiente ricevente avviene soltanto attraverso il componente considerato. Invece, si parla di trasmissione indiretta o fiancheggiante quando la trasmissione dell'energia sonora nell'ambiente ricevente avviene attraverso le strutture adiacenti a quella considerata [57]. Questo tipo di trasmissione del suono deve sempre essere considerato attentamente, in quanto implica che aumentare eccessivamente l'isolamento acustico di un elemento oltre quello fornito dagli elementi ad esso adiacenti risulta inutile e dispendioso. Tuttavia, la trasmissione indiretta è difficile da quantificare, in quanto è estremamente complicato riassumere il fenomeno dell'accoppiamento strutturale fra partizioni diverse, oltre al fatto che il contributo di questo tipo di trasmissione può variare in funzione all'accuratezza dei lavori di costruzione eseguiti [26].

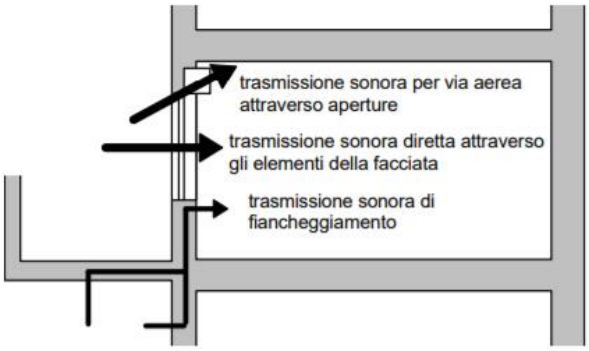



Fig. 1: Meccanismi di trasmissione del suono in una facciata

## 2.3 Il potere fono isolante

Quando il fronte di un'onda sonora incide sulla superficie di una parete, l'energia trasportata dall'onda viene trasformata in vibrazione forzata o risonante della parete. Successivamente, l'energia della vibrazione meccanica della parete si trasforma in:

- energia dissipata sotto forma di calore;
- energia acustica che ritorna per via aerea nell'ambiente da cui proviene l'onda incidente, cioè viene riflessa
- energia acustica che viene trasmessa all'ambiente adiacente

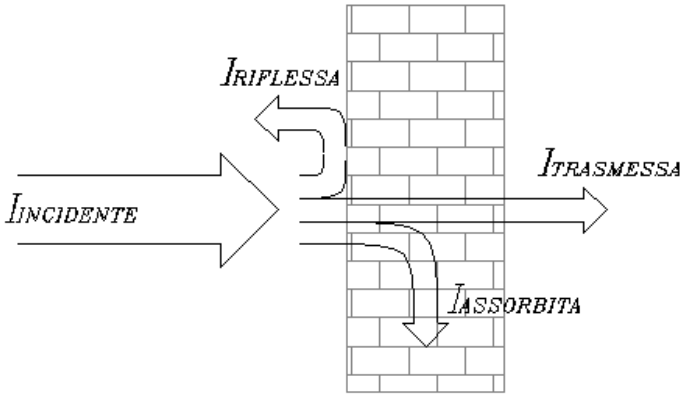



Fig.2: Ripartizione della potenza sonora di un'onda incidente la superficie di una parete

Indicando con $I_{inc}$ la potenza sonora, cioè l'energia sonora nell'unità di tempo, che incide sulla parete e rispettivamente con $I_{rifl}$, $I_{trasm}$ e $I_{diss}$ le frazioni di potenza riflessa, trasmessa e dissipata dalla parete, è possibile scrivere la relazione:

$$I_{inc} = I_{rifl} + I_{trasm} + I_{diss} \qquad \text{Eq.3}$$

Dividendo entrambi i membri dell'equazione per $I_{inc}$ è possibile riscrivere tale relazione come:

$$1 = \rho + \tau + \delta \qquad \text{Eq.4}$$

dove $\rho$ è il coefficiente di riflessione, $\tau$ il coefficiente di trasmissione e $\delta$ il coefficiente di assorbimento della parete [27].

Generalmente, nell'edilizia è rivolta particolare attenzione al coefficiente di trasmissione, infatti questo rappresenta la capacità di una struttura, che separa due ambienti, di trasmettere energia acustica da un ambiente all'altro. Di conseguenza, per ottenere un buon isolamento acustico è necessario che la parete in esame presenti un basso coefficiente di trasmissione. In questo senso, una delle grandezze più utilizzate nell'ambito dell'isolamento acustico è definita proprio in relazione a questo coefficiente, cioè il potere fonoisolante (R). Il potere fonoisolante è una grandezza che dipende solo dalle caratteristiche della facciata e viene misurato in laboratorio utilizzando due camere speciali tra le quali sono eliminati tutti i vincoli strutturali, in modo da ottenere solo trasmissione diretta attraverso la facciata. Trattandosi di una grandezza misurata in laboratorio, tuttavia, non ha un grande uso pratico, in quanto la conoscenza del potere fonoisolante di una facciata o di un elemento di facciata risulta utile soltanto in fase di

progettazione. Infatti, per valutare la trasmissione di una facciata, o di un elemento di facciata, nelle condizioni di esercizio (in opera) si utilizza il potere fonoisolante apparente $R'$. Si tratta di una grandezza del tutto analoga al potere fonoisolante, che però tiene conto anche della trasmissione indiretta. Ovviamente, a parità di livello di pressione sonora dell'ambiente emittente, R' risulta sempre inferiore ad R.

## 2.4. Calcolo del potere fonoisolante e dell'abbattimento acustico

Per facciata si intende l'intera superficie esterna di una stanza. La facciata consiste di diversi elementi, ad es. pareti, finestre, porte, apparecchiature di ventilazione; la trasmissione del suono attraverso la facciata è dovuto alla trasmissione del suono da parte di ciascuno di questi elementi. Si assume che la trasmissione per ogni elemento sia indipendente dalla trasmissione degli altri elementi. Il potere fonoisolante apparente (cioè misurato in opera), R', della facciata per il suono incidente diffuso può essere calcolato, mediante l'Eq. 5 [24], sulla base del potere fonoisolante dei singoli elementi costituenti la facciata, considerando i contributi diretti (sia per via strutturale che per via aerea) e di fiancheggiamento o indiretti (per via strutturale):

$$R' = (-10\log(\sum_{i=1}^{n} \tau_{e,i} + \sum_{f=1}^{m} \tau_f)) \text{ [dB]} \qquad \text{Eq.5}$$

dove $\tau_{e,i}$ è il coefficiente di trasmissione di un elemento di facciata legato alla trasmissione diretta, mentre $\tau_f$ è il coefficiente di trasmissione di un elemento di facciata f legato alla trasmissione fiancheggiante, n è il numero di elementi di facciata legati alla trasmissione diretta, m è il numero di elementi di facciata legati alla trasmissione fiancheggiante. Per calcolare i rapporti $\tau_{e,i}$ occorre fare la distinzione tra un piccolo elemento e uno di altro tipo. Per piccoli elementi si intendono elementi di facciata di superficie minore di 1 $m^2$, ad esclusione di finestre e porte, in accordo con la ISO 140-10 [28] (ad esempio prese d'aria, ventilatori, condotti elettrici ecc.). I coefficienti di trasmissione dei piccoli elementi legati alla trasmissione diretta vengono calcolati usando l'Eq. 6:

$$\tau_{e,i} = \frac{A_0}{S} 10^{-D_{n,e,i}/10} \quad \text{[dB]} \qquad \text{Eq.6}$$

dove $A_0$ è l'area di assorbimento acustico equivalente di riferimento (per le abitazioni è pari a 10 $m^2$), Dn,e,i è l'abbattimento acustico del piccolo elemento i [dB], S è l'area totale della facciata vista dall'interno [$m^2$]:

$$D_{n,e,i} = -10\log(\frac{S_{open,i}}{A_0}) \quad \text{[dB]} \qquad \text{Eq.7}$$

dove $A_0$ = 10$m^2$ e $S_{open}$,i è l'area dell'apertura del piccolo elemento i [$m^2$].
I coefficienti di trasmissione degli elementi di altro tipo (muro, finestra, porta) legati alla trasmissione diretta vengono calcolati utilizzando l'Eq.8:

$$\tau_{e,i} = \frac{S_i}{S} 10^{-R_i/10} \quad \text{[dB]} \qquad \text{Eq.8}$$

dove $R_i$ è il potere fonoisolante dell'elemento i [dB], $S_i$ è l'area dell'elemento i [$m^2$], S è l'area totale della facciata vista dall'interno [$m^2$].

K è la correzione relativa al contributo globale della trasmissione fiancheggiante. Tale termine può essere assunto pari a 0 per elementi di facciata non connessi e pari a 2 per elementi di facciata pesanti con giunti rigidi. Per una valutazione più accurata della trasmissione di fiancheggiamento si deve calcolare il potere fonoisolante relativo ad ogni percorso di trasmissione fiancheggiante e quindi fare la somma energetica dei diversi valori di R'. Il metodo di calcolo è descritto dal progetto di norma CEN 12354-1 [60].
Sostituendo l'Eq. 6 e 8 nell'Eq. 5, e tenendo conto della correzione dovuta alla trasmissione fiancheggiante, si ottiene il potere fonoisolante apparente della facciata:

$$R' = -10 \log \left[ \sum_{i=1}^{n} \frac{S_i}{S} 10^{\frac{-R_i}{10}} + \sum_{i=1}^{n} \frac{A_0}{S} 10^{\frac{-Dn,e,i}{10}} \right] - K \quad \text{[dB]} \qquad \text{Eq.9}$$

L'abbattimento acustico della facciata può essere correlato al potere fonoisolante R' tramite la quantità $D_{2m,nT}$ che rappresenta la capacità di una facciata, riferita ad uno specifico ambiente interno, di ridurre il rumore proveniente dall'esterno misurato a 2 m dalla facciata.
L'abbattimento acustico deve essere normalizzato rispetto al tempo di riverberazione (T). Questo dipende dal potere fono isolante della facciata, dalla forma esterna della facciata (es. presenza di balconi) e dalle dimensioni della stanza (aumenta all'aumentare del volume). Inoltre, $D_{2m,nT}$ è altamente influenzato dalla presenza di elementi di facciata quali finestre, porte o piccole aperture (vedi Fig. 1). Viene calcolato con l'eq. 10, previsto dalla norma europea EN ISO 12354 - 3 [63].

$$D_{2m,nT} = R' + \Delta L_{fs} + (10 \log \left( C_{sab} \frac{V}{T_0 S} \right)) \qquad \text{[dB]} \qquad \text{Eq.10}$$

dove R' è il potere fono isolante apparente della facciata [dB], V è il volume della stanza ricevente [$m^3$], $T_0$ è il tempo di riverbero di riferimento (per le abitazioni è dato come 0,5 s) [s], S è l'area totale della facciata vista dall'interno [$m^2$], $C_{sab}$ è la costante di Sabine (pari a 0,16 [s/m]) e $\Delta L_{fs}$ è un termine correttivo che tiene conto della forma della facciata [dB].
La forma della facciata può influire sul potere fono isolante (R') di questa in senso positivo o negativo, cioè maggiore o minore valore di R'. Il primo caso può essere determinato dall'effetto di schermatura dovuto a parti sporgenti della facciata come balconi; il secondo dalla formazione di un campo riverberante dovuto a riflessioni multiple sulle superfici di parti della facciata (nicchie, ecc.). Questa influenza può essere quantificata mediante il termine $\Delta L_{fs}$, differenza di livello per forma della facciata, definito attraverso l'Eq.11 come la differenza tra il livello globale di pressione sonora ($L_{1,2\ m}$) a due metri dal piano della facciata ed il livello medio di pressione sonora sulla superficie esterna della facciata ($L_{1,s}$), incluso l'effetto della forma, più 3 dB.

$$\Delta L_{fs} = L_{1,2\ m} - L_{1,s} + 3 \qquad \text{[dB]} \qquad \text{Eq.11}$$

Il termine $\Delta L_{fs}$ dipende dalla forma della facciata, dall'assorbimento delle superfici aggettanti (balconi) e dalla direzione del campo sonoro [61]. La forma si individua su una sezione verticale della facciata in cui le eventuali barriere (parapetti di balconi, ecc.) sono indicati solo se a sezione piena; l'assorbimento αw si riferisce all'indice di valutazione dell'assorbimento sonoro come definito dalla EN-ISO 11654 [24]. Il valore massimo per αw (≥0,9) si applica anche qualora la superficie riflettente sopra la facciata sia assente. La direzione dell'onda sonora incidente si caratterizza mediante l'altezza definita dalla intersezione tra la linea di veduta dalla sorgente ed il

piano della facciata (Fig. 3).

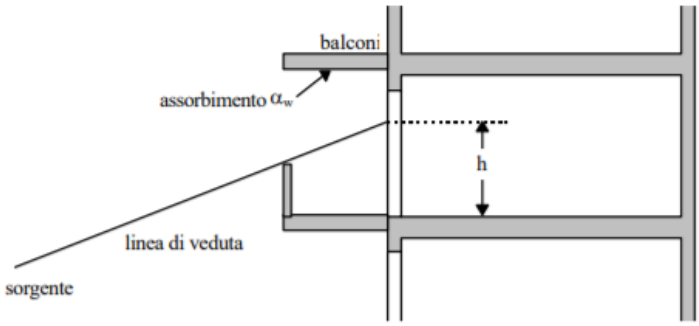



Fig.3: Individuazione di alcune grandezze da impiegare nel modello di calcolo

| | Facciata piana | balcone | | | balcone | | | balcone | | | balcone | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\alpha_w$ | non si applica | ≤0,3 | 0,6 | ≤0,9 | ≤0,3 | 0,6 | ≤0,9 | ≤0,3 | 0,6 | ≤0,9 | ≤0,3 | 0,6 | ≤0,9 |
| h < 1,5 m | 0 | -1 | -1 | 0 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 | non si applica | | |
| 1,5≤h≤2,5 m | 0 | non si applica | | | -1 | 0 | 2 | 0 | 1 | 3 | non si applica | | |
| h>2,5 m | 0 | non si applica | | | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 6 |

| | balcone | | | balcone | | | balcone | | | terrazza | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | schermature aperte | | | schermature chiuse | | |
| $\alpha_w$ | ≤0,3 | 0,6 | ≥0,9 | ≤0,3 | 0,6 | ≥0,9 | ≤0,3 | 0,6 | ≥0,9 | ≤0,3 | 0,6 | ≥0,9 | ≤0,3 | 0,6 | ≥0,9 |
| h < 1,5 m | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 |
| 1,5≤h≤2,5 m | -1 | 1 | 3 | 0 | 2 | 4 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 5 | 6 | 7 |
| h>2,5 m | 1 | 2 | 3 | 2 | 3 | 4 | 1 | 1 | 2 | 4 | 4 | 5 | 6 | 6 | 7 |

Tabella 1: Valore della differenza di livello per forma della facciata ( $\Delta L_{fs}$ ) per alcuni casi tipo

Dal momento che le grandezze acustiche variano al variare della frequenza, dovrebbero essere analizzate nel dominio della frequenza così da riprodurre la reale esposizione umana al fastidio. Tuttavia solitamente viene utilizzata la normativa ISO 717-1, la quale consente di ridurre i valori di tali grandezze, alle diverse bande di frequenza, in valori a singolo indice, contraddistinti dal pedice "w" [55]. Il pedice "w" significa "weighted" (pesato) ad indicare la ponderazione di tale

coefficiente su tutte le frequenze appartenenti al campo di interesse. Il potere fonoisolante apparente ponderato $R_w^{'}$ e l'abbattimento acustico ponderato $D_{nT,w}$ [30] sono valori a singolo indice utilizzati generalmente per poter confrontare il comportamento complessivo di pareti dal punto di vista dell'isolamento acustico [31]:

$$D_{2m,nT,w} = R^{'}_{w} + \Delta L_{fs} + 10\log\frac{V}{6T_0 S} \quad [dB] \qquad Eq.12$$

## 2.5. Modello analitico per la stima dell'potere fonoisolante ponderato degli elementi

Il potere fono isolante ponderato, $R_w$, viene utilizzato per misurare il livello di isolamento fornito da un elemento costruttivo come muro, finestra, porta. Più alto è $R_w$, migliore è la prestazione di isolamento acustico dell'elemento considerato. Mediante test in laboratorio sono state proposte diverse formule empiriche per la previsione del potere fono isolante ponderato di un elemento $R_{wi}$. I valori del potere fonoisolante riportati nel seguito provengono da dati sperimentali [8] e possono essere impiegati quando non siano disponibili altri dati sui componenti in esame. Tali formule consentono di prevedere $R_{wi}$ a partire dalla massa per unità di superficie, m' [kg/m$^2$] dell'elemento [32]. Queste formule, tuttavia, forniscono risultati che non sono sempre congruenti e quindi dovrebbero essere usati con cautela.

Di seguito, si riportano le formule empiriche implementate nel codice di calcolo del comfort acustico:

$$R_{w,wall} = 37.5\log(m^{'}) - 42 \quad [dB] \qquad Eq.13$$
$$R_{w,window} = 12\log(m^{'}) + 17 \quad [dB] \qquad Eq.14$$
$$R_{w,door} = 20\log(m^{'}) \quad [dB] \qquad Eq.15$$

## 2.6. Modello analitico per la stima dell'incremento del potere fonoisolante ponderato in presenza di uno strato aggiuntivo

Se ad una parete esistente viene applicato uno strato aggiuntivo, con interposto un mezzo elastico, viene determinato un sistema risonante a doppio strato, determinando un miglioramento del potere fonoisolante della struttura. In assenza di dati sperimentali, l'aumento del potere fono isolante ponderato può essere calcolato come una funzione della frequenza di risonanza del sistema composto dalla struttura di base e dal rivestimento, secondo la EN ISO 12354 parte 3:

$$f_0 = 160\sqrt{s'(\frac{m1'+m2'}{m1'm2'})} \quad [Hz] \qquad Eq.16$$

dove s' è la rigidità dinamica dello strato isolante [MN/m$^3$] (secondo la EN 29052-1[33]), $m_1$' è la massa per unità di superficie della struttura di base [kg/m$^2$] e $m_2$' è la massa per unità di superficie dello strato aggiuntivo [kg/m$^2$].

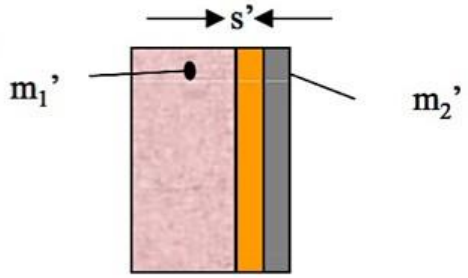


Fig.4: Parametri del sistema risonante a doppio strato

Al diminuire della frequenza di risonanza ($f_0$), le prestazioni acustiche dell'intera struttura migliorano. A parità di muro (m'), ci sarà un $\Delta R_w$ maggiore quando:

•$m_2'$ dello strato aggiuntivo aumenta;

• s' dello strato isolante diminuisce.

Il miglioramento del potere fono isolante dovuto allo strato aggiuntivo ($\Delta R_w$) è calcolato secondo l'eq. 17:

$$\Delta R_w = 72 - (\frac{R_{w\,m1}'}{2} + 20\log(f_0)) \qquad \text{[dB]} \qquad \text{Eq.17}$$

Dove $R_{w,m1'}$ è il potere fonoisolante della parete esistente, avente massa per unità di area pari a m1', $f_0$ è la frequenza di risonanza del sistema [Hz].

Il valore complessivo del potere fonoisolante della parete esterna ($R_{w,wall}$) a cui viene applicato uno strato aggiuntivo, è dato dall'Eq. 18:

$$R_{w,wall} = R_{w,m_1'} + \Delta R_w \qquad \text{[dB]} \qquad \text{Eq.18}$$

## 2.7 Stima del tempo di riverbero

Per individuare le qualità acustiche di uno spazio chiuso e, di conseguenza, per attivare gli interventi più idonei a innalzarne il livello, per esempio di fonoisolamento e di fonoassorbimento, è fondamentale tener presente anche il fenomeno della riverberazione, espresso dal parametro tempo di riverberazione. Tale fenomeno dipende dalla frequenza del suono emesso dalla sorgente, dal volume dell'ambiente, dalla superficie e dalla natura delle pareti, dall'arredamento e dalla presenza, o meno, di occupanti [34], [35].

Il tempo di riverbero ($T_{60}$[s]) è l'indicatore più comunemente usato per quantificare il comportamento acustico di uno spazio. Il tempo di riverbero nella stanza ricevente ($T_{60}$) è definito come il tempo necessario per il decadimento della densità di energia sonora di 60 dB dopo che la sorgente ha smesso di emettere. Tale fenomeno dipende dalla frequenza del suono emesso dalla sorgente, dal volume dell'ambiente, dalla superficie e dalla natura delle pareti, dall'arredamento e dalla presenza, o meno, di occupanti [34], [35]. Come regola generale, una stanza più grande ha un tempo di riverbero più lungo, poiché il suono deve viaggiare maggiormente prima di incontrare le pareti della stanza per poi riflettersi nello spazio. Allo stesso modo, le stanze con più assorbimento tendono ad avere tempi di riverbero più brevi in quanto la quantità di energia rimossa in ogni

riflessione è più grande. Il tempo di riverbero può essere misurato seguendo le procedure indicate dalla ISO 3382-2 [37], che prevede due diversi metodi, ovvero il metodo del rumore interrotto e il metodo della risposta all'impulso. Tuttavia, può anche essere simulato secondo la formula di Sabine, poiché è correlato con il volume e l'assorbimento dell'ambiente. La norma EN ISO 12354-6 [36] propone un modello di calcolo per stimare il tempo di riverbero di uno spazio chiuso. In condizioni di campo sonoro diffuso, per una stanza riverberante con pareti di natura geometrica e acustica omogenea, il tempo di riverbero può essere stimato in base al coefficiente di assorbimento medio delle pareti, secondo la formula di Sabine (Eq. 19):

$$T_{60} = \frac{55{,}3 * V(1-\psi)}{c_0 * A} \quad [\text{s}] \quad \text{Eq.19}$$

dove V è il volume della stanza [$m^3$], $c_0$ è la velocità del suono nell'aria [m/s] (il rapporto 55,3/ $c_0$ si assume pari a 0,16, poiché la velocità del suono deve essere assunta pari a 345,6 m/s), $\psi$ è la frazione di oggetto, che rappresenta il rapporto tra la somma del volume di tutti gli elementi [36] e il volume dell'ambiente vuoto, e A è l'assorbimento totale equivalente entro la stanza [$m^2$], calcolato come segue:

$$A = \sum_{i=1}^{n} s_i \alpha_i \quad [\text{m}^2] \quad \text{Eq.20}$$

dove $\alpha_i$ è il coefficiente di assorbimento di ciascun materiale costituente l'interno della stanza [-], $s_i$ è la velocità del suono nell'aria [m/s].

## 2.8 Stima del livello di pressione sonora interna

Valutate le grandezze necessarie, è possibile calcolare il livello medio di pressione sonora equivalente interno, secondo la EN ISO 12354-3 [24], mediante l'Eq. 21:

$$L_2 = L_{1,2m} - D_{2m,nT} + 10\log\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad [\text{dB}] \quad \text{Eq.21}$$

dove $L_2$ è il livello medio di pressione sonora equivalente nella stanza ricevente [dB], $L_{1,2m}$ è il livello di pressione sonora media a 2 m davanti alla facciata della stanza [dB], $D_{2m,nT}$ è l'abbattimento acustico standardizzato rispetto al tempo di riverbero (T) della facciata della stanza [dB], $T_0$ è il tempo di riverbero di riferimento [s] (0,5s) e T è il tempo di riverbero nella stanza ricevente [s].

L'eq. 21 vale nell'ipotesi di campo sonoro diffuso (tale condizione è stata assunta in questa tesi) [54], [41]. Il livello medio di pressione sonora equivalente interno tuttavia non tiene conto della sensibilità del sistema uditivo a bassa e alta frequenza. Questo può essere risolto usando un livello di pressione sonora equivalente interna ponderata A [dB(A)]. La ponderazione A è la frequenza di ponderazione più utilizzata perché attenua drasticamente le frequenze inferiori a 1kHz, enfatizzando invece quelle comprese tra 1kHz e 5kHz. Ciò comporta che nella determinazione del livello globale i contributi distribuiti nel range di frequenze in cui l'orecchio umano è più sensibile saranno significativi rispetto agli altri [42].

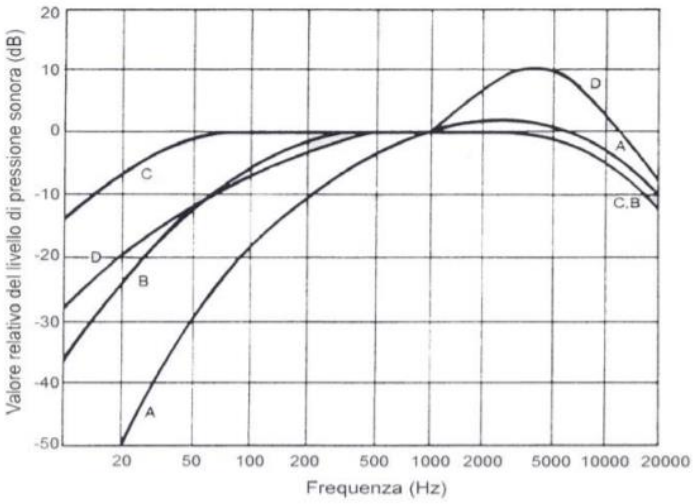



Fig.5: Curve di ponderazione

# CAPITOLO 3: MODELLO PER IL CALCOLO DEL COMFORT ACUSTICO

## 3.1 Architettura del codice

Il codice, sviluppato da Livia Claudi nella sua tesi, mira a fornire uno strumento per misurare il comfort acustico all'interno degli edifici. La metrica sviluppata per esprimere il comfort acustico è rappresentata dai Key Performance Indicators (KPI). Il codice sviluppato integra dati sperimentali, misurati da microfoni, e dati numerici, stimati da modelli matematici basati su rilevamenti diretti e ipotesi, e dati soggettivi (vedi Fig. 7).

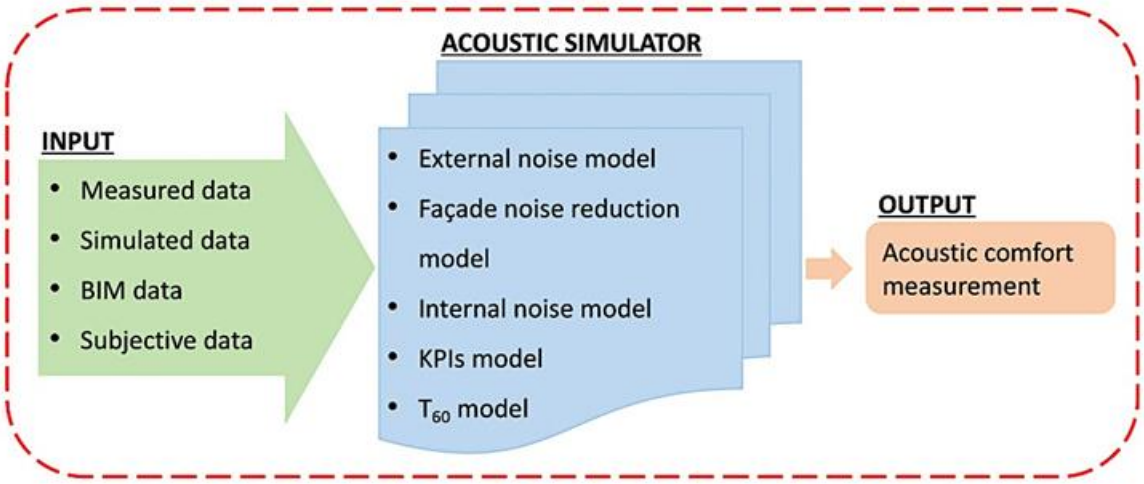



Fig.7: Il codice sviluppato da Livia Claudi per la misurazione del comfort acustico

Il codice sviluppato, denominato modulo acustico, contiene degli algoritmi implementati in linguaggio Python, i quali si basano sui modelli analitici descritti nel capitolo 2, per stimare il livello medio di pressione sonora equivalente interna e di conseguenza calcolare il KPI. Il KPI fornisce una misura indiretta del comfort acustico di edifici esistenti e permette di confrontare, eventualmente, diversi potenziali scenari di ristrutturazione. La procedura completa di calcolo dei KPI è dettagliatamente descritta nel paragrafo 3.2. Vi sono due tipologie di KPI, che operano in maniera complementare, con lo scopo di misurare il comfort acustico attraverso una valutazione oggettiva e una soggettiva. Nella presente tesi si andrà ad applicare solo il primo. Il primo KPI si basa sulla valutazione oggettiva delle grandezze acustiche, ovvero i livelli medi di pressione sonora equivalente all'interno di ogni stanza. Il secondo KPI è rappresentativo della valutazione soggettiva degli occupanti dell'edificio, ed è utilizzato per validare il KPI oggettivo. L'uso dei KPI è fondamentale per qualsiasi strategia di miglioramento, poiché permette di effettuare una rapida analisi comparativa [45].

## 3.2 Metodologia di calcolo del KPI oggettivo

Il KPI oggettivo si basa sulla valutazione dei livelli medi di pressione sonora equivalente all'interno dell'edificio, secondo l'Eq. 21. La procedura generale è delineata in Fig.8. Se i livelli medi di pressione sonora equivalente all'interno dell'edificio sono determinati mediante misurazioni sul campo, la procedura inizia dal punto 3.

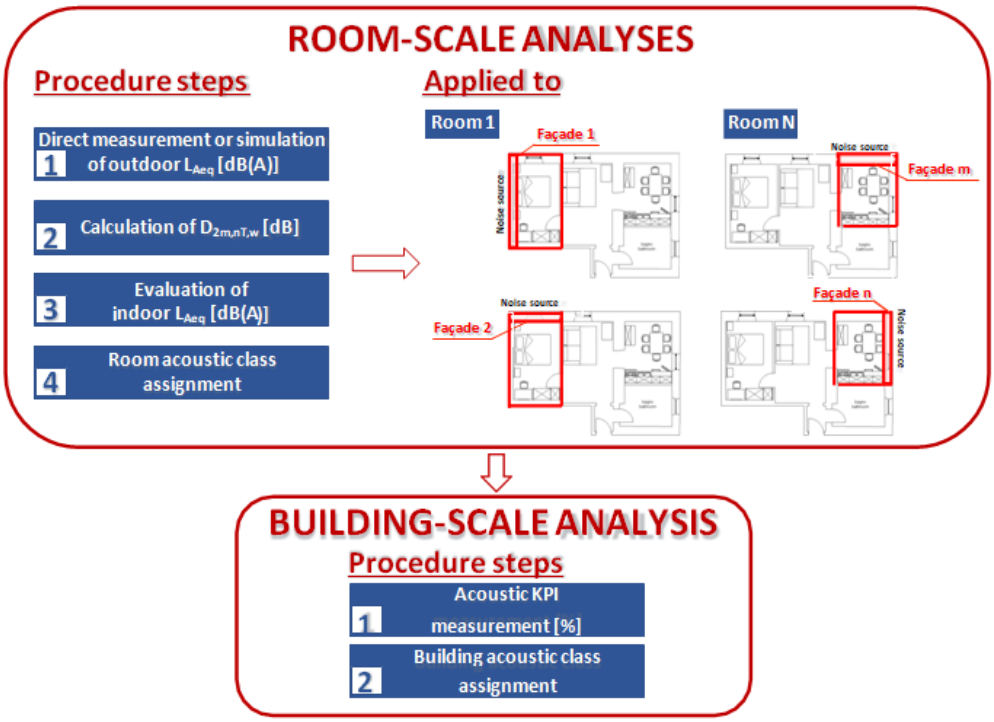



Fig.8: Schematizzazione della metodologia di misurazione del KPI oggettivo

In questa analisi solo le stanze che sono confinanti con l'ambiente esterno e che sono occupate per più ore, come camere da letto, soggiorni, uffici, aule,…, vengono considerate, mentre stanze come bagni, corridoi, piccoli magazzini,… vengono escluse dall'analisi.
Per le stanze incluse nell'analisi viene determinato il livello medio di pressione sonora equivalente ponderato interno (LAeq, [dB(A)]) in modo diretto, cioè misurandolo, o indiretto, e sulla base di questo viene assegnata una classe acustica (Fig.9). La classe acustica di una stanza è definita mediante dei valori limite del livello di pressione sonora equivalente ponderato interno (LAeq,, dB(A)) che variano a seconda della destinazione d'uso della stanza. I valori limite variano da Paese a Paese e non esiste una classificazione regolamentata uniforme circa il livello di pressione sonora equivalente ponderato interno (LAeq, [dB(A)]).

| Type of space | Class A | Class B | Class C | Class D | Class E |
|---|---|---|---|---|---|
| Bedroom | $L_{Aeq} \leq 30$ | $30 < L_{Aeq} \leq 32.5$ | $32.5 < L_{Aeq} \leq 35$ | $35 < L_{Aeq} \leq 40$ | $L_{Aeq} > 40$ |
| Living room / kitchen | $L_{Aeq} \leq 35$ | $35 < L_{Aeq} \leq 37.5$ | $37.5 < L_{Aeq} \leq 40$ | $40 < L_{Aeq} \leq 45$ | $L_{Aeq} > 45$ |
| Hotel bedroom | $L_{Aeq} \leq 35$ | $35 < L_{Aeq} \leq 37.5$ | $37.5 < L_{Aeq} \leq 40$ | $40 < L_{Aeq} \leq 45$ | $L_{Aeq} > 45$ |
| Classroom | $L_{Aeq} \leq 35$ | $35 < L_{Aeq} \leq 37.5$ | $37.5 < L_{Aeq} \leq 40$ | $40 < L_{Aeq} \leq 45$ | $L_{Aeq} > 45$ |
| Nursery school | $L_{Aeq} \leq 40$ | $40 < L_{Aeq} \leq 42.5$ | $42.5 < L_{Aeq} \leq 45$ | $45 < L_{Aeq} \leq 50$ | $L_{Aeq} > 50$ |
| Office | $L_{Aeq} \leq 35$ | $35 < L_{Aeq} \leq 37.5$ | $37.5 < L_{Aeq} \leq 40$ | $40 < L_{Aeq} \leq 45$ | $L_{Aeq} > 45$ |
| Conference room | $L_{Aeq} \leq 35$ | $35 < L_{Aeq} \leq 37.5$ | $37.5 < L_{Aeq} \leq 40$ | $40 < L_{Aeq} \leq 45$ | $L_{Aeq} > 45$ |
| Hospital | $L_{Aeq} \leq 35$ | $35 < L_{Aeq} \leq 37.5$ | $37.5 < L_{Aeq} \leq 40$ | $40 < L_{Aeq} \leq 45$ | $L_{Aeq} > 45$ |
| Retail shop | $L_{Aeq} \leq 45$ | $45 < L_{Aeq} \leq 47.5$ | $47.5 < L_{Aeq} \leq 50$ | $50 < L_{Aeq} \leq 55$ | $L_{Aeq} > 55$ |

Fig.9: Classe acustica delle varie stanze

La classificazione acustica delle varie stanze va dalla classe A (alto livello di comfort acustico) alla classe E (livello di comfort acustico pessimo). Quindi ad ogni stanza viene assegnato un punteggio che va da 5 (Classe A) a 1 (E), come descritto nella Fig.10.

| Class | Score [-] |
|---|---|
| A | 5 |
| B | 4 |
| C | 3 |
| D | 2 |
| E | 1 |

Fig. 10: Punteggio assegnato ad ogni classe acustica

Una volta assegnato il punteggio ad ogni stanza, è possibile calcolare il KPI dell'intero edificio secondo l'Eq. 22, ovvero un punteggio che va da 5 (valore ottimo) a 1 (valore pessimo).

$$KPI = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} A_i * RA_i}{A_{tot}}\right) \quad [-] \qquad \text{Eq.22}$$

dove $A_i$ è la superficie di riferimento di ogni stanza confinante con l'ambiente esterno i [$m^2$], $RA_i$ è il punteggio assegnato a ciascuna stanza i [-] e $A_{tot}$ è la superficie totale di riferimento di tutti le stanze confinanti con l'ambiente esterno [$m^2$]. In seguito il KPI viene espresso con una scala percentuale dallo 0% al 100%, attraverso una interpolazione lineare da 1 a 5, dove il punteggio 1 corrisponde allo 0% e il punteggio 5 al 100%. Da questi valori di KPI andremo a definire la classe acustica dell'edificio (Fig.11).

| Class A | Class B | Class C | Class D | Class E |
|---|---|---|---|---|
| 87.5%<KPI≤100% | 62.5%<KPI≤87.5% | 37.5%<KPI≤62.5% | 12.5%<KPI≤37.5% | 0%≤KPI≤12.5% |

Fig. 11: Assegnazione classe acustica dell'edificio

La classe acustica rappresenta un modo comprensibile per esprimere il livello di comfort acustico, in quanto ad ogni classe è associato un diverso significato:

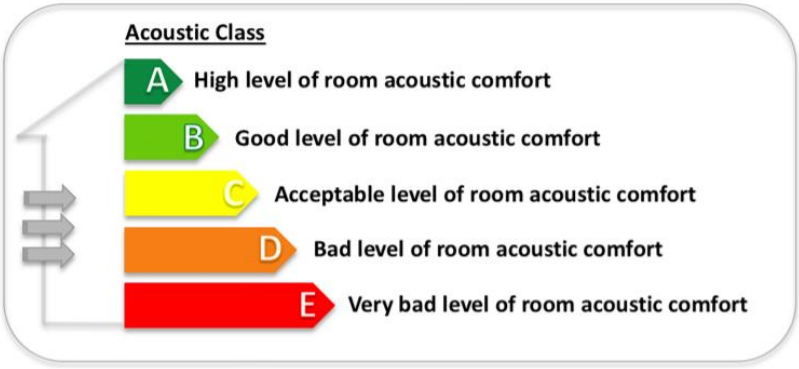



Fig. 12: Significato di ogni classe acustica

Bisogna ricordare, però, che il KPI è una grandezza rappresentativa dell'intero edificio, quindi può nascondere condizioni di disagio locali. Tuttavia il modulo acustico fornisce in uscita, oltre al KPI dell'intero edificio, anche informazioni locali (a livello di singola stanza e singola facciata), al fine di individuare situazioni di disagio localizzato (stanze o facciate critiche) ed eventualmente intervenire solo su queste.

## 3.3 Modello di calcolo per supportare il processo decisionale negli interventi di ristrutturazione

Il modello di calcolo sviluppato per la misurazione del comfort acustico degli edifici supporta il processo decisionale durante la progettazione, confrontando diversi scenari esistenti o anche diversi scenari di ristrutturazione (Fig. 13):

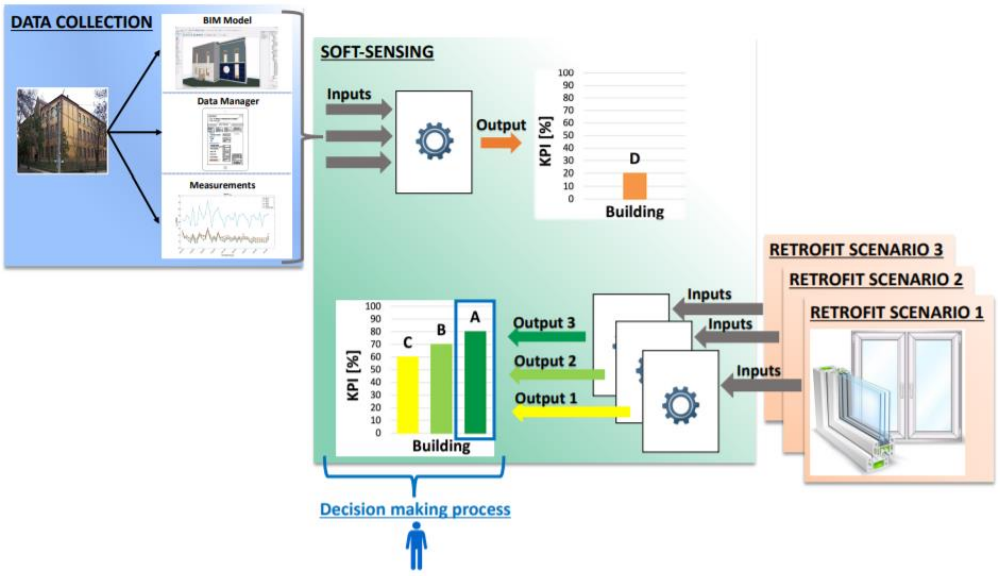



Fig. 13: Supporto del modello di calcolo al processo decisionale

Quando tutti i dati di input relativi all'edificio oggetto di indagine sono stati raccolti, vengono utilizzati dal modello di calcolo per misurare il comfort acustico dell'edificio. Come prima cosa si valuta lo stato attuale dell'immobile, attraverso il KPI "as-is". Se le condizioni di comfort acustico non sono soddisfatte, il progettista dell'edificio e/o l'utente seleziona diversi interventi di ristrutturazione (ad es. cambio di finestre) e la simulazione (post-ristrutturazione) viene eseguita nuovamente. Le uscite dell'analisi "what-if" consentono all'utente e/o il progettista di prendere decisioni sul migliore intervento di ristrutturazione da installare, in termini di comfort acustico all'interno dell'edificio.
La fattibilità dell'approccio sviluppato, per supportare il processo decisionale, è stata dimostrata attraverso l'applicazione a 2 semplici edifici nel paragrafo 3.6.1 e 3.6.2 .

## 3.4 Processo di raccolta e memorizzazione dei dati per eseguire il modulo acustico

Data Manager è lo strumento web-based che guida l'utente e/o progettista nella fase di raccolta dei dati necessari per la costruzione del DIM Server (District Information Model Server), che potrebbe essere un compito complesso per i progetti di ristrutturazione in cui i dati dell'edificio sono sparsi o addirittura non disponibili . Tale server, opportunamente interrogato, restituisce i dati in input richiesti relativi all'edificio in esame. I dati richiesti vengono mostrati all'utente e/o progettista, mediante lo strumento Data Manager, così da semplificare la raccolta dati per l'analisi di comfort acustico.
Lo strumento Data Manager fornisce due approcci per raccogliere i dati necessari per la costruzione del DIM Server:
1. Raccolta dati dettagliata: ad es. l'utente inserisce manualmente, nel Data Manager, il valore del potere fonoisolante equivalente ponderato degli elementi costruttivi.

2. Raccolta dati per approssimazione: es. l'utente seleziona tra dei valori tipici, ad es. del potere fonoisolante equivalente ponderato degli elementi costruttivi, mostrati dallo strumento Data Manager, nel caso in cui l'utente e/o progettista non conosce il valore della grandezza considerata. Per prima cosa sono richiesti i dati relativi alla definizione delle facciate. L'utente deve inserire informazioni specifiche riguardanti la facciata, come il livello del pavimento (es. piano terra, primo piano, secondo piano, ecc.), l'uso della stanza (es. camera da letto, soggiorno, aula, ecc.), la forma della facciata (es. piana, con balcone, ecc.). Anche gli elementi della facciata devono essere definiti (muro, finestre, porte, piccoli elementi), comprese le caratteristiche acustiche (se note) o le proprietà dei materiali costituenti (che potrei ricavare dal BIM se presente). Le stanze coinvolte nell'analisi di comfort acustico sono solo le stanze che hanno almeno una facciata confinante con l'ambiente esterno, dette Room Facade.
Le stanze possono avere più di una Room Facade (Fig. 14).

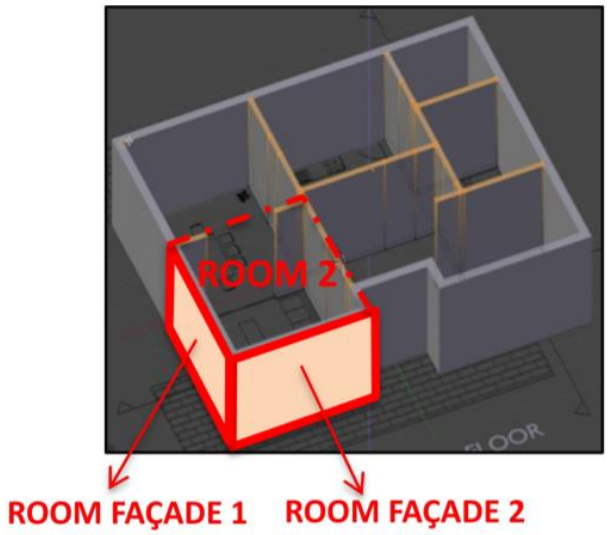



Fig. 14: Identificazione delle Room Facade (RF) di una stanza

Per ogni facciata deve essere definito il valore del livello di pressione sonora equivalente esterna dalla mappatura acustica strategica.

In Fig. 15 viene fornito uno schizzo dello strumento Data Manager e alcuni esempi dei dati di input richiesti per la costruzione del DIM Server.

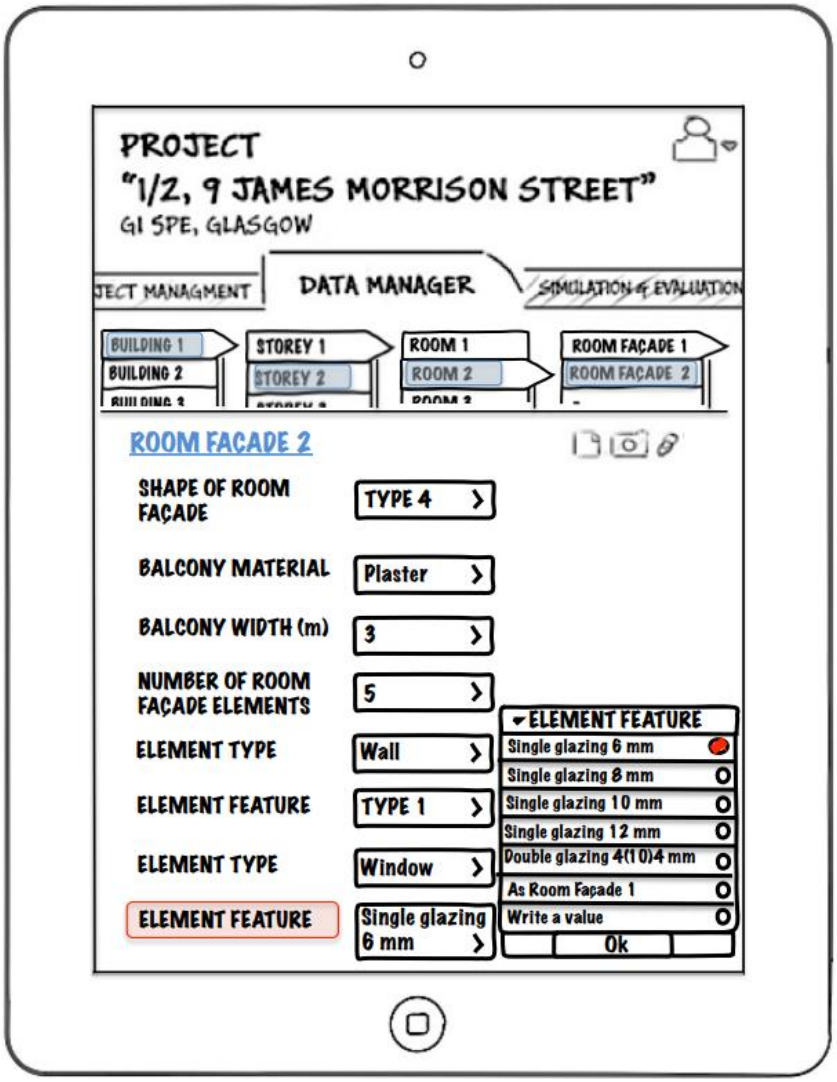


Fig. 15: Strumento Data Manager a supporto della raccolta dati

Le informazioni raccolte vengono gestite e archiviate nel DIM server. In particolare, le informazioni che arrivano al DIM Server vengono raccolte in file CSV poiché ogni opzione selezionata dall'utente dei campi Data Manager corrisponde ad un valore numerico nei file CSV.
Il comma-separated values (CSV), cioè "valori separati da virgola", è un formato di file basato su file di testo utilizzato per l'importazione ed esportazione, ad esempio da fogli elettronici o database, di dati contenuti all'interno delle singole celle di una tabella e separati appunto da delle virgole. Il formato CSV non specifica una codifica di caratteri, né la convenzione per indicare il fine linea né il carattere da usare come separatore tra campi e nemmeno convenzioni per rappresentare date o numeri (tutti i valori sono considerati come semplici stringhe di testo) e se la prima riga è solo di intestazione o meno. Questi dettagli possono dover essere specificati dall'utente tutte le volte che si importano o esportano dati in formato CSV in un programma come ad esempio un foglio elettronico. Si capisce quindi come i file CSV, per quanto efficienti da un punto di vista computazionale, risultano di difficile gestione e interpretazione umana.

Sotto viene mostrato un esempio di codifica in file CSV (Fig. 16).

| Data Manager field | Data Manager options | CSV file encoding | Data type |
|---|---|---|---|
| BUILDING | 1 | 1 | Integer |
| | 2 | 2 | |
| | n | n | |
| LAND USE CATEGORY | Countryside | 1 | Integer |
| | Residential area | 2 | |
| | Urban area | 3 | |
| FLOOR | Ground floor | 1 | Integer |
| | First floor | 2 | |
| | Secondo floor | 3 | |
| | n | n | |
| USE | Bedroom | 1 | Integer |
| | Living room | 2 | |
| | Hotel bedroom | 3 | |
| | Classroom | 4 | |
| | Nursery school | 5 | |
| | Office | 6 | |
| | Conference room | 7 | |
| | Hospital | 8 | |
| | Retail shop | 9 | |

Figura 16: Data Manager- Codifica file CSV

| | A | B | C |
|---|---|---|---|
| 1 | 1,1,4,1,1,24.26,57,-99,-99,-99,-99 | | |
| 2 | 1,1,4,2,2,1.4,36,-99,-99,-99,-99 | | |
| 3 | 1,1,4,3,2,3.9,36,-99,-99,-99,-99 | | |
| 4 | 1,1,4,4,2,1.44,36,-99,-99,-99,-99 | | |

Figura 17: Esempio di file CSV

## 3.5 Le simulazioni di comfort acustico

Il modulo acustico contiene algoritmi per la valutazione del comfort acustico. Quando tutto gli input sono stati raccolti nel DIM Server, vengono inviati nel modulo acustico, tramite file CSV. Il DIM Server esporta due diverse tipologie di file CSV: il primo file CSV, detto “RoomFacade.csv”, contiene dati sul distretto, edificio, stanze e facciate delle stanze. Questo file CSV non cambia quando viene eseguita la simulazione post-ristrutturazione. Il secondo file CSV, detto “ElementFacade.csv” contiene informazioni sugli elementi di facciata (pareti, finestre, porte, piccoli elementi). Solo il secondo CSV cambia quando si applicano interventi di post-ristrutturazione. Una volta ricevuti i dati richiesti, gli algoritmi contenuti all'interno del modulo acustico effettuano la simulazione del comfort acustico, calcolando i KPI.
Le simulazioni "as-is” e "What-if", cioè pre e post-ristrutturazione, vengono eseguite separatamente: la prima analisi che viene effettuata è la simulazione "as-is", al fine di valutare il comfort acustico dell'edificio prima di qualsiasi intervento di ristrutturazione. Se il comfort acustico trovato non è soddisfacente, sono necessari interventi di ristrutturazione e quindi è necessario effettuar nuove simulazioni, dette appunto “What-it”. Il progettista e/o utente dell'edificio seleziona diversi interventi di ristrutturazione (ad es. scambio di finestre), al fine di migliorare il comfort acustico all'interno dell'edificio, ed esegue nuovamente la simulazione. Infine, i risultati vengono archiviati nel server DIM e vengono poi inviati in output all'utente, consentendogli di prendere decisioni informate su quale può essere il miglior intervento di ristrutturazione da installare al fine di migliorare il comfort acustico all'interno dell'edificio.
Gli output forniti all’utente sono anch’essi 2 file CSV: il file “SimulationResults.csv” contiene l’output relativo a ciascun edificio, mentre il file “SimulationReports.csv” rappresenta l’output riguardante il distretto.

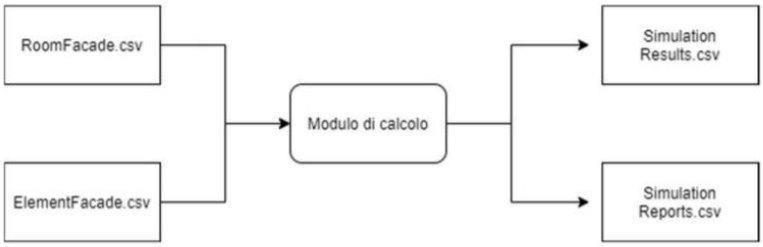



Fig. 18: Input e output del modulo acustico

Gli algoritmi all’interno del modulo acustico si basano sui modelli teorici descritti nel capitolo 2 e nel paragrafo 3.2 . Lo scopo finale è valutare i KPI, come misura indiretta del comfort acustico

dell'edificio. Gli algoritmi sono stati implementati in linguaggio di programmazione Python, e consentono la valutazione di:

1. Livello di pressione sonora equivalente esterno davanti alla facciata di ogni stanza
2. Potere fonoisolante ponderato della facciata della stanza, attraverso la valutazione del potere fonoisolante ponderato degli elementi di facciata (parete, finestra, porta e piccoli elementi) (Eq.9)
3. Differenza di livello sonoro ponderata di ogni facciata di stanza (Eq.12)
4. Tempo di riverbero della stanza (Eq.19)
5. Livello di pressione sonora equivalente all'interno di ogni locale confinante con l'ambiente esterno (Eq.21)
6. KPI oggettivi (Eq.22) e soggettivi

Il modulo acustico consente di eseguire anche analisi di singola stanza e facciata della stanza, che permettono un rapido confronto della classe e dei parametri acustici della stanza e della facciata della stanza pre e post ristrutturazione.

Il flusso di lavoro degli algoritmi viene mostrato nella Fig.19:

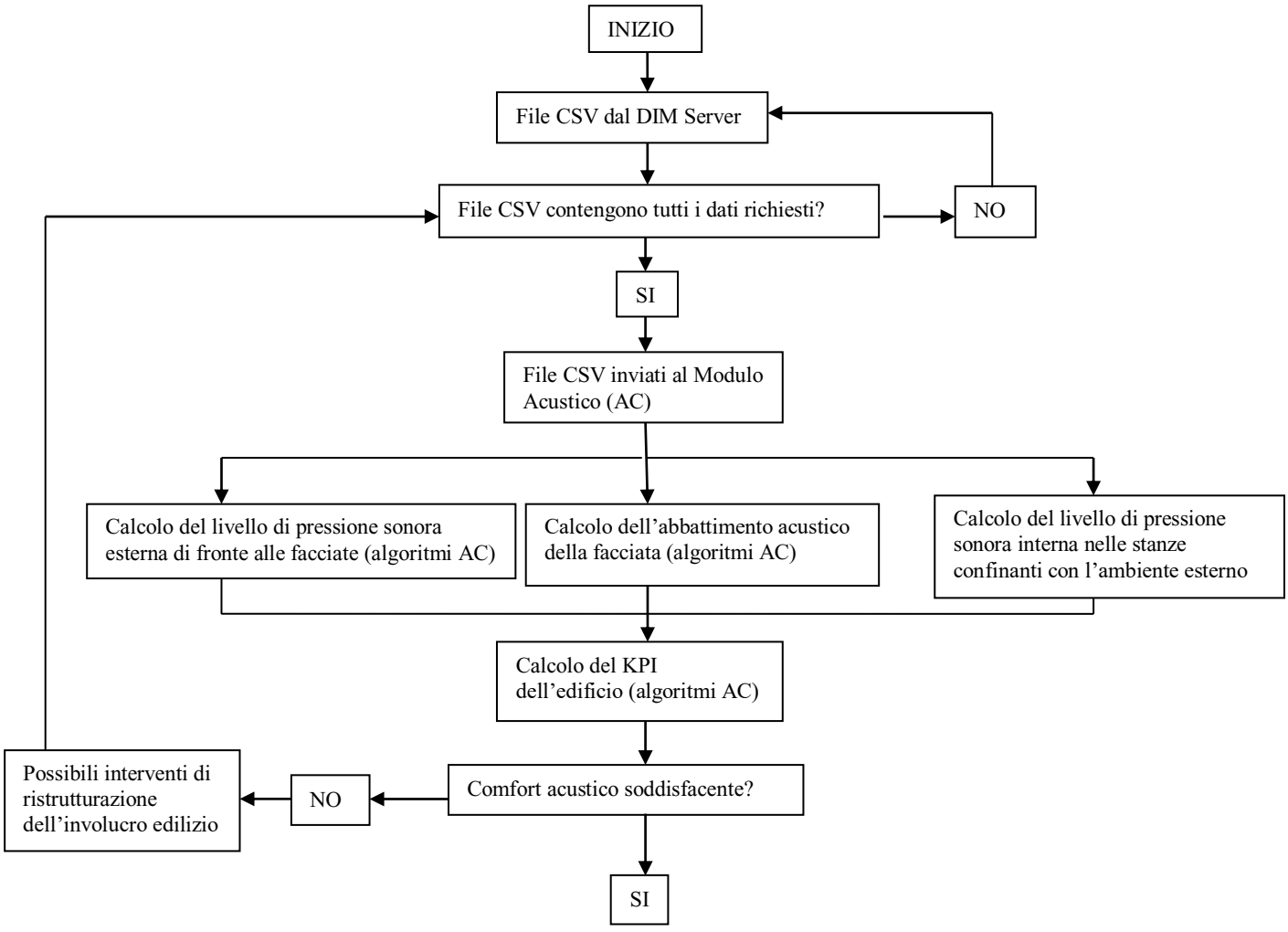



Fig.19: flusso di lavoro degli algoritmi

## 3.6 CASI DI STUDIO

Ai fini di dimostrare l'applicabilità dei metodi proposti nei paragrafi precedenti vengono presi in esame due semplici casi di studio. Data la semplicità dei casi presi in esame in questa trattazione i file CSV ("elements" e "roomfacade") sono stati costruiti manualmente, osservando le informazioni richieste dallo strumento Data Manager, e inviati direttamente al DIM Server.

### 3.6.1 Stanza Univpm

E' stata presa in esame una stanza del laboratorio del Gruppo di Misure Meccaniche dell'Università Politecnica delle Marche situata al piano terra, la cui facciata è posta in corrispondenza di un sottopasso.

Fig.20: Facciata del laboratorio su cui sono state effettuate le misurazioni

La facciata in questione misura $4{,}430\ m$ in larghezza e $3{,}380\ m$ in altezza, mentre la profondità della stanza a cui appartiene misura $3{,}250$ . Per la determinazione del potere fonoisolante della facciata è stato generato un rumore bianco all'esterno dell'edificio, mediante una sorgente sonora calibrata. Il livello di pressione sonora equivalente esterno e interno sono stati misurati mediante un microfono esterno, posto in  in prossimità della facciata, e cinque microfoni uniformemente distribuiti nell'ambiente interno. In seguito, a partire dall'Eq.21, si è calcolato l'Rw dell'intera facciata che è risultato pari a 33 dB(A) nel caso di finestre chiuse e 10 dB(A) nel caso di finestre aperte. Si è poi misurato il livello di pressione sonora equivalente ponderata esterna reale che, data la vicinanza con la strada, è risultato pari a 60 dB(A).

Quindi si sono analizzati inizialmente questi 2 casi reali:

1) Caso di finestre chiuse
2) Caso di finestre aperte

Si sono poi presi in esame altri 3 casi ipotetici:

3) Caso di livello di pressione sonora equivalente ponderata esterna pari a 50 dB(A) con finestre chiuse

4) Caso di livello di pressione sonora equivalente ponderata esterna pari a 50 dB(A) pari a 50 dB(A) con finestre aperte
5) Caso di livello di pressione sonora equivalente ponderata esterna pari a 50 dB(A) pari a 60 dB(A) e Rw pari a 40 dB(A)

I 5 casi in esame sono stati riassunti nella seguente tabella:

| caso in esame | Rw dell'intera facciata (dB(A)) | Livello di pressione sonora equivalente ponderata esterna (dB(A)) |
|---|---|---|
| 1 | 33 | 60 |
| 2 | 10 | 60 |
| 3 | 33 | 50 |
| 4 | 10 | 50 |
| 5 | 40 | 60 |

Tabella 2: Schematizzazione dei 5 casi presi in esame

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti circa il livello di pressione sonora equivalente ponderata interna e il Building KPI per i 5 casi in esame:

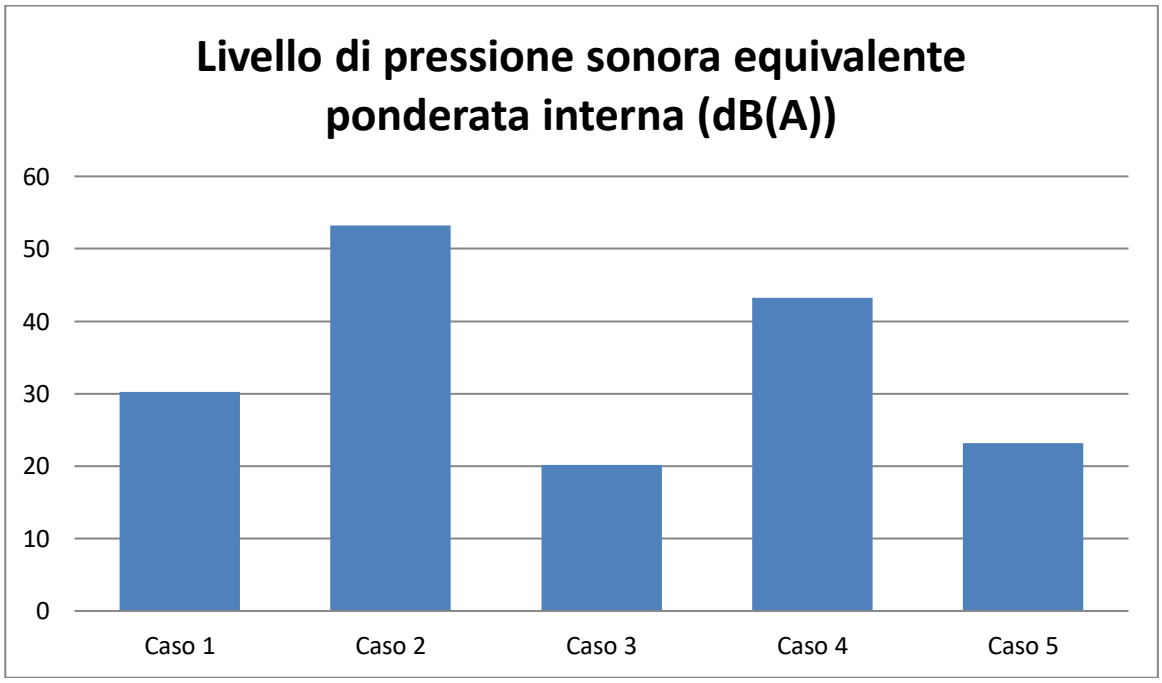



Fig. 21: Stima del livello di pressione sonora equivalente interna dei 5 casi in esame

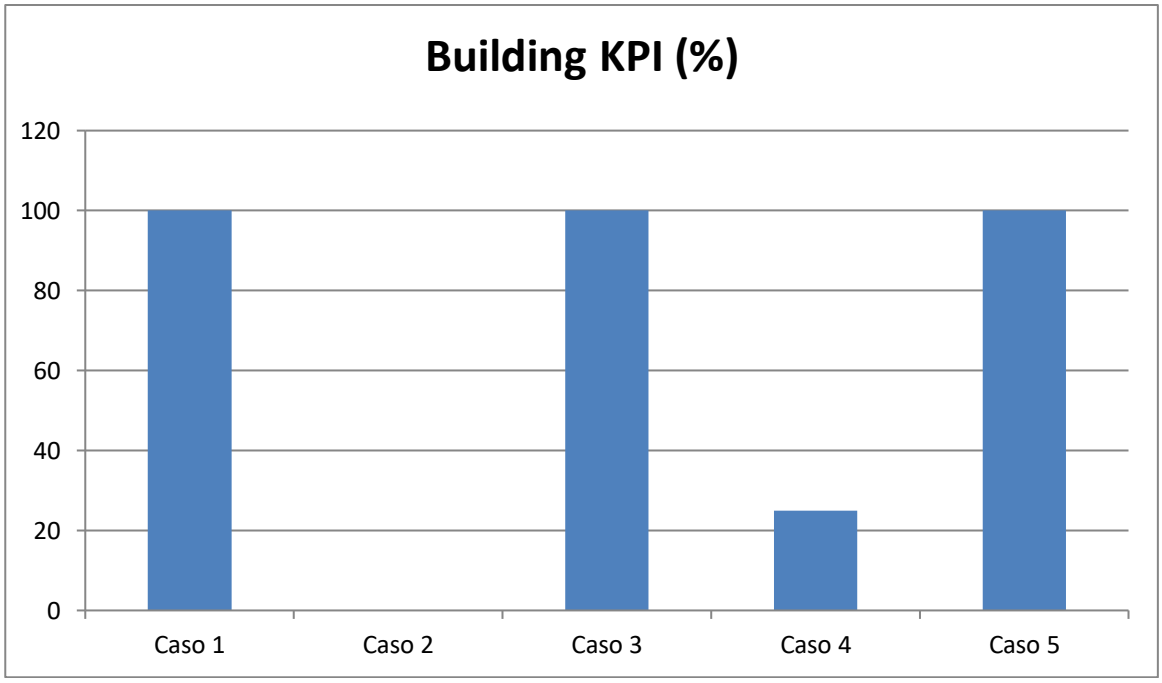



Fig. 22: Building KPI dei 5 casi in esame

A conferma dell'applicabilità del metodo, il KPI varia secondo le aspettative:
- si riduce all'aumentare del rumore esterno
- si riduce al diminuire dell'Rw.

Si nota che nel caso reale 2, ovvero quelli in cui le finestre sono aperte e il livello di pressione sonora equivalente ponderata è di 60 dB(A), si è in una condizione di pessimo comfort acustico dell'edificio. Per risolvere tale problema è stata svolta un'analisi in cui si valuta l'andamento del KPI al variare del Rw dell'intera facciata.

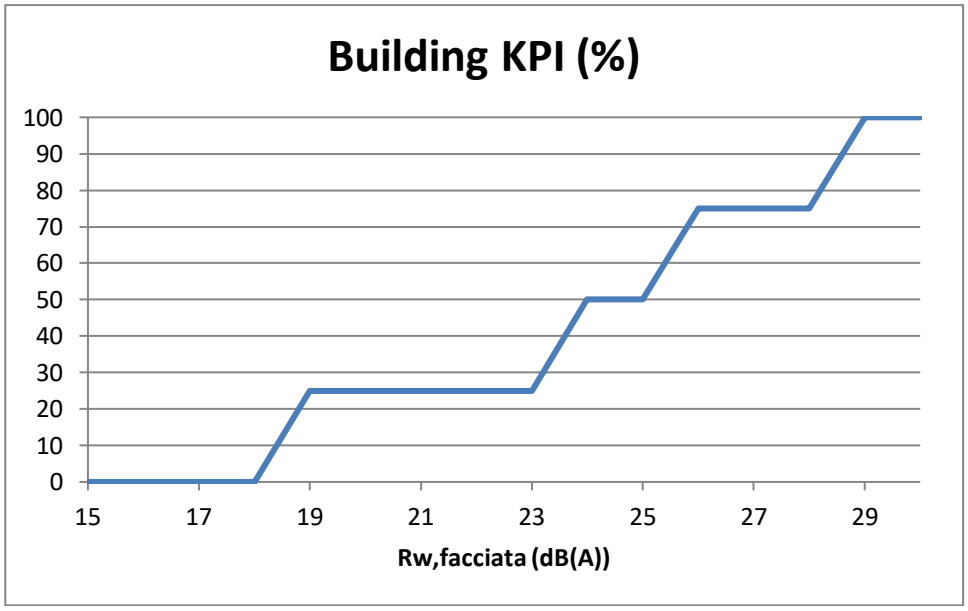



Figura 23: Andamento del Building KPI in funzione del Rw,facciata

Si è trovato che, affinchè il KPI sia del 100%, l'Rw dell'intera facciata deve essere almeno pari a 29 dB(A). Così facendo dall'Eq.9, considerando un potere fonoisolante delle finestre nullo (cioè finestre aperte), si può ricavare il potere fonoisolante che dovrà avere la muratura in modo da avere mediamente un comfort acustico ottimo interno alla stanza, nonostante le finestre aperte.

### 3.6.2 Aula di una scuola materna di Genova

Come secondo caso di studio è stata presa in esame un'aula al primo piano di una scuola materna di volume pari a 128,4 $m^3$, con superficie del pavimento pari a 31,3 $m^2$. Quest'aula presenta una facciata, di area pari a 31 $m^2$, posta in corrispondenza di una strada. Tale facciata è composta dalla muratura e da 3 finestre, di cui sono stati misurati gli Rw. E' stata realizzata una campagna di misura del livello di pressione sonora equivalente esterna davanti all'aula, e mediante una ponderazione di tipo A si è trovato un valore di 61,6 dB(A). Sempre per verificare l'applicabilità del metodo è stato preso in esame il caso reale, appena descritto, più altri 4 casi ipotetici a parità di livello di pressione sonora equivalente ponderata esterna:

1) Caso reale: - muratura con superficie pari a 24,26 $m^2$ e Rw pari a 57 dB(A)

   - finestre singolo vetro da 20 mm con Rw di 33 dB(A) e superfici pari 1.4 $m^2$, 3.9 $m^2$ e 1.44 $m^2$

2) finestre doppio vetro 8:16:8 mm con Rw pari a 41 dB(A) e muratura come nel caso reale

3) Supporto in laterizi alveolati di spessore pari a 35 cm con un cappotto di 6 cm in lana di roccia con leganti a base di resina termodinamica, per un Rw complessivo di 60 dB(A). Le finestre sono le stesse del caso reale

4) Muratura con cappotto come nel caso 3) e finestre doppio vetro (Rw=41 dB(A))

5) Muratura e finestre come nel caso reale ma le finestre presentano un'area di 3 m2 ciascuna

I 5 casi in esame sono riassunti nella seguente tabella:

| Caso di studio | Rw muratura (dB(A)) | Superficie muratura ($m^2$) | Rw finestre (dB(A)) | Superficie finestra 1 ($m^2$) | Superficie finestra 2 ($m^2$) | Superficie finestra 3 ($m^2$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 57 | 24.26 | 33 | 1.4 | 3.9 | 1.44 |
| 2 | 57 | 24.26 | 41 | 1.4 | 3.9 | 1.44 |
| 3 | 60 | 24.26 | 33 | 1.4 | 3.9 | 1.44 |
| 4 | 60 | 24.26 | 41 | 1.4 | 3.9 | 1.44 |
| 5 | 57 | 22 | 33 | 3 | 3 | 3 |

Tabella 3: Schematizzazione dei 5 casi presi in esame

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti circa il livello di pressione sonora equivalente ponderata interna e il Building KPI per i 5 casi presi in esame:

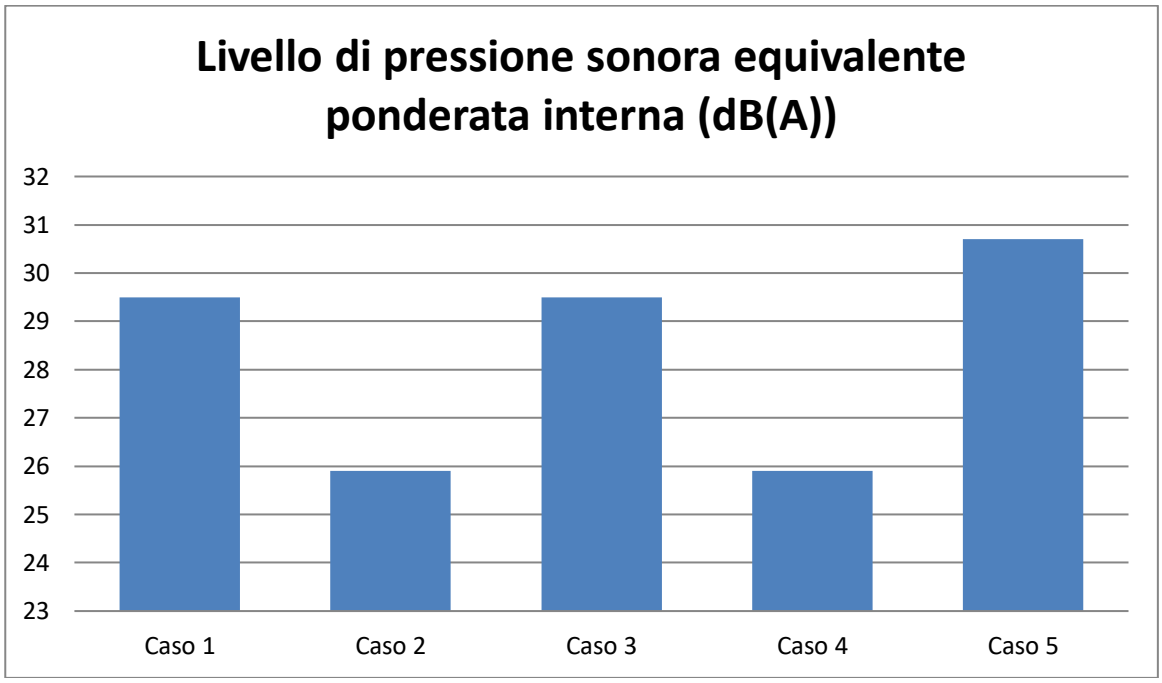



Fig.24: Stima del livello di pressione sonora equivalente interna dei 5 casi in esame

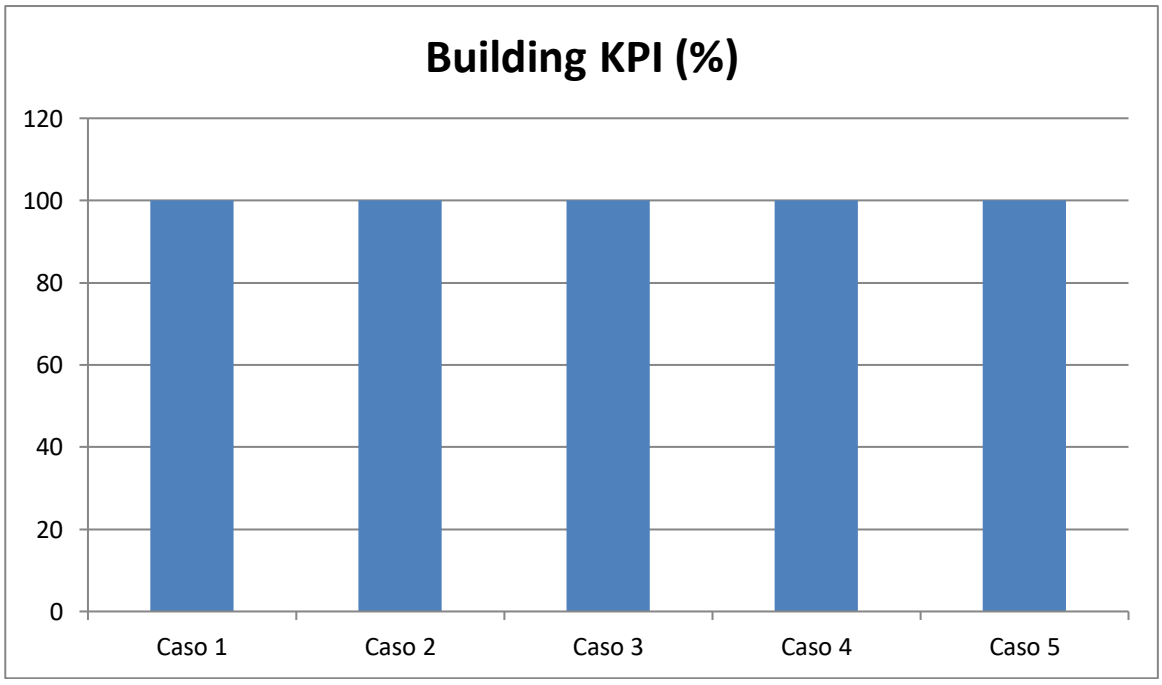



Fig.25: Building KPI dei 5 casi in esame

L'edificio reale presenta già un ottimo livello di comfort acustico, quindi non sono necessari interventi di ristrutturazione. Dall'osservazione dei casi ipotetici si intuisce che se volessi ridurre ulteriormente il livello di pressione sonora equivalente ponderata interna, interventi come

l’aggiunta di un cappotto termico non hanno effetto, bensì bisogna intervenire sulle finestre inserendo, ad esempio, delle finestre a doppio vetro.

# CAPITOLO 4: INTEGRAZIONE DEL MODULO PER IL CALCOLO DEL COMFORT ACUSTICO CON IL BUILDING INFORMATION MODEL

Si entra ora nella seconda parte della tesi, che è focalizzata sull'obiettivo per cui questa è nata. Questa parte mostra l'integrazione della procedura generale di calcolo del comfort acustico, mostrata nel capitolo 3, con il Building Information Model degli edifici.

## 4.1 Il Building Information Model

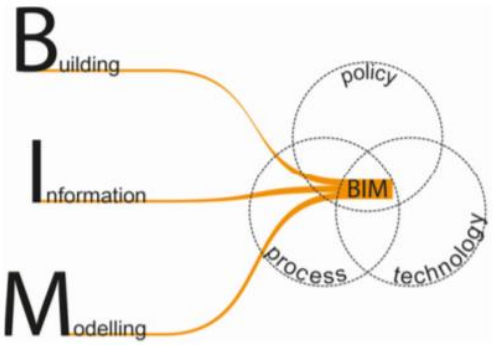



Fig.26: Il Building Information Model

In passato, ma spesso anche al giorno d'oggi, le fasi di progettazione, costruzione, fino a tutto il ciclo di vita dell'edificio erano frammentati e i flussi di informazioni soffrivano di discontinuità, cioè non sempre avveniva una comunicazione efficace tra ogni stakeholder del processo. La comunicazione tra gli stakeholder del processo risultava ancora più complessa per i progetti di ristrutturazione, in quanto il progetto aumenta di complessità a causa dei vincoli aggiuntivi legati alle strutture esistenti e agli occupanti. Inoltre l'introduzione di nuovi materiali più performanti nelle prestazioni strutturali e energetiche, la progettazione di sistemi tecnici ed impiantistici più efficienti e l'integrazione con le energie rinnovabili, sia per le nuove costruzioni che per le ristrutturazioni, ha determinato un aumento esponenziale degli stakeholder del processo.
Si è quindi reso necessario ricorrere ad una progettazione (e una costruzione) "sostenibile" anche nelle fasi di gestione, conduzione e manutenzione. Quindi gli stakeholder hanno iniziato a portare avanti un nuovo paradigma per la progettazione e la produzione edilizia, chiamato Building Information Model (BIM).

Il Building Information Model (BIM), cioè "modellizzazione delle informazioni di un edificio", indica un metodo per l'ottimizzazione della pianificazione, realizzazione e gestione di costruzioni tramite l'aiuto di un software.

Quindi il ruolo di BIM nell'industria delle costruzioni, attraverso i suoi diversi stakeholder (architetti, ingegneri, geometri, periti, costruttori, clienti,…) è di sostenere la comunicazione, la cooperazione, la simulazione e il miglioramento ottimale di un progetto lungo il ciclo completo di vita di un edificio [62]. La costruzione virtuale è visualizzabile inoltre come un modello geometrico 3D, e i dati contenuti nel modello sono numerosi, in quanto, definiscono tutte le informazioni

riguardanti uno specifico componente di una costruzione. Le informazioni più comunemente raccolte in un BIM riguardano la localizzazione geografica, la geometria, le proprietà dei materiali e degli elementi tecnici, le fasi di realizzazione, le operazioni di

manutenzione. In questo senso, un modello tridimensionale della geometria di un edificio utilizzato solo per simulazioni grafiche (rendering) non può essere considerato BIM. [48]

I sistemi Building Information Model hanno reso quindi possibile l'integrazione nell'attività di progettazione, costruzione e gestione di informazioni di diversa natura e il loro utilizzo sinergico, consentendo così ad ogni stakeholder del processo di aggiungere, modificare, e avere sempre i riferimenti di tutte le informazioni nello stesso istante che vengono usate o create nel BIM, attraverso l'interoperabilità tra le piattaforme tecnologiche [64]. Costituisce, quindi, una risorsa di conoscenza condivisa per le informazioni su una struttura, formando una base affidabile per le decisioni durante il suo ciclo di vita, dall'ideazione fino allo smaltimento. Inoltre, ne deriva una riduzione delle perdite di informazioni associate ai passaggi del progetto ad esempio dal team di progettazione al team di costruzione o al proprietario.
I modelli BIM sono utilizzabili nelle diverse applicazioni BIM (Autodesk Revit, ArchiCAD e Tekla).

Autodesk Revit è il software CAD e BIM più noto, e l'attuale leader di mercato BIM nella progettazione architettonica.

## 4.2 Integrazione del modulo acustico con il modello BIM degli edifici

Data l'importanza di considerare gli aspetti legati al comfort acustico già in sede di progettazione, come spiegato nel capitolo 1, e data l'importanza del BIM nell'intero ciclo di vita di un edificio, come descritto nel paragrafo 4.1, si è reso necessario lo sviluppo di una nuova procedura di calcolo del comfort acustico a partire dai dati contenuti nel BIM.
Questo deriva dal fatto che la procedura generale di calcolo del comfort acustico, descritta nel capitolo 3, non risulta essere pratica nel caso specifico in cui i dati vengano reperiti direttamente dal modello BIM dell'edificio. Infatti nei modelli BIM degli edifici, soprattutto riferiti ad edifici vecchi da riqualificare, mancano diverse informazioni tra le quali, principalmente, il potere fonoisolante dei vari elementi di facciata. Risulta quindi necessario sviluppare una procedura ad "hoc" per questa applicazione specifica.
Sono state, quindi, eseguite alcune modifiche nei dati di input richiesti dal modulo di calcolo originale, con l'obiettivo, appunto, di facilitare l'integrazione di questo con i BIM degli edifici. Questo aspetto verrà spiegato nel paragrafo 4.2.2.

### 4.2.1 Interfaccia del modulo di calcolo

In questo paragrafo verranno descritte le ulteriori modifiche sviluppate, alla procedura generale di calcolo del comfort acustico descritta nel capitolo 3, sempre allo scopo di perseguire l'idea del BIM, cioè di rendere più snello e ottimale il progetto lungo l'intero ciclo di vita di un edificio (a partire ovviamente dalla fase progettuale).

Le modifiche effettuate derivano da 2 osservazioni circa la procedura descritta nel capitolo 3:

a) I file CSV, per quanto efficienti da un punto di vista computazionale, risultano di difficile gestione einterpretazione umana
b) Il modulo di calcolo può essere eseguito esclusivamente su file locali ed il suo utilizzo risulta quindi precluso ad utenti esterni.

I ricercatori del dipartimento, hanno quindi sviluppato un involucro software che rende fruibili le funzionalità del modulo di calcolo sottoforma di API ("Application Programming Interface") basate su

protocollo HTTP. In tal modo, l'interazione con il modulo diviene più snella e universale, in quanto è possibile accedere alle sue risorse tramite un qualsiasi client web o sfruttando le librerie apposite di ogni linguaggio di programmazione. Il formato tramite cui inviare i dati è il JSON, facilmente comprensibile e ormai standard delle comunicazioni web-based.

In Fig.27 è riportata, in sintesi, la nuova struttura del sistema.

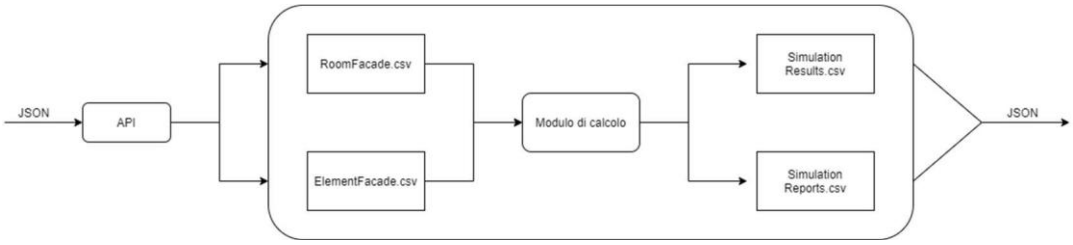



Fig. 27 – Strategia dell'interfaccia del modulo di calcolo

Come visibile, non sono state apportate modifiche interne al modulo di calcolo, le cui modalità di input e output sono rimaste le medesime. L'involucro si colloca infatti ad un livello superiore e ne gestisce la comunicazione con l'esterno. I file CSV di input sono creati a partire dal JSON allegato nella richiesta e, allo stesso modo, i file CSV di output sono uniti in un unico JSON che viene poi inviato all'utente che ha effettuato la chiamata.

L'architettura del sistema presenta un ulteriore vantaggio: l'utente non interagisce direttamente con il modulo di calcolo, ma con la piattaforma, che effettua un processo di sanificazione dell'input, non previsto nella versione iniziale, che preserva da potenziali problemi di sicurezza o di arresto non preventivato.

### 4.2.2 Struttura dei dati di input

Il JSON, che deve essere allegato alla richiesta effettuata verso l'API, è composto da due oggetti, secondo una ripartizione che mappa l'input del modulo di calcolo.

Il primo oggetto, identificato dalla chiave "RoomFacade", è relativo alle facciate degli edifici; i suoi attributi sono riportati in Fig.28 con dati esemplificativi.

**RoomFacade:**

- "District land use category" : 2
- "District_Total number of buildings" : 1
- "Building_ID" : [1,1,1,1,1…]
- "Building_Total number of room facades of each building": 68,
- "RoomFacade_ID" : [1,2,3,4,5…],
- "Room_ID" : [1,2,2,3,3,4,5,6..]
- "RF_Surface" : [6.90, 1.86, 6.95, 6.95, 1.86, 8.9…]
- "RF_Strategic Noise Mapping value" : [0, 0, 0, 0, 0…],
- "RF_Balcony material" : [-99, -99, -99, -99, -99, -99…]
- "RF_Balcony width" : [-99, -99, -99, -99, -99, -99, -99…]

- "Rooms" : {
  "Room use" : [2,2,2,2,1..],
  "Room volume" : [25.5,31.03,31.03,25.5,30.32…]
  "Room floor area" : [10.43,12.64,12.64,10.43…]
  "Room shape" : [1,1,1,1…],
  "Room floor":[2,2,2,2…]
  }

| | |
|---|---|
| Countryside | 1 |
| Residential area | 2 |
| Urban area | 3 |

Tutti gli "arrays" ha un numero per ogni RoomFacade (RF)

| | |
|---|---|
| Plaster | 1 |
| Soundproof plaster | 2 |
| Wood | 3 |
| Rough concrete | 4 |
| Glass sheet | 5 |

| | |
|---|---|
| Bedroom | 1 |
| Living room | 2 |
| Hotel bedroom | 3 |
| Classroom | 4 |
| Nursery school | 5 |
| Office | 6 |
| Conference room | 7 |
| Hospital | 8 |
| Retail shop | 9 |

Tutti gli "arrays" hanno un numero per ogni stanza

| | |
|---|---|
| Ground floor | 1 |
| First floor | 2 |
| Second floor | 3 |
| Third floor | 4 |
| Fourth floor | 5 |
| … | … |

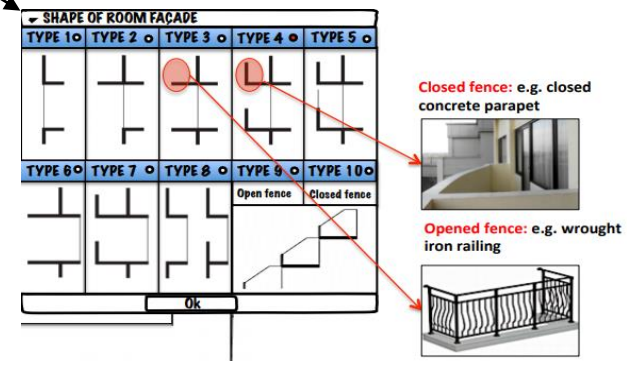



Fig.28: Attributi dell'oggetto denominato "Room Facade"

Il secondo oggetto, la cui struttura è visibile in Fig.29, contiene invece le informazioni riguardanti gli elementi di facciata ed è caratterizzato dalla chiave “ElementsFacade”.

**Element Facade**

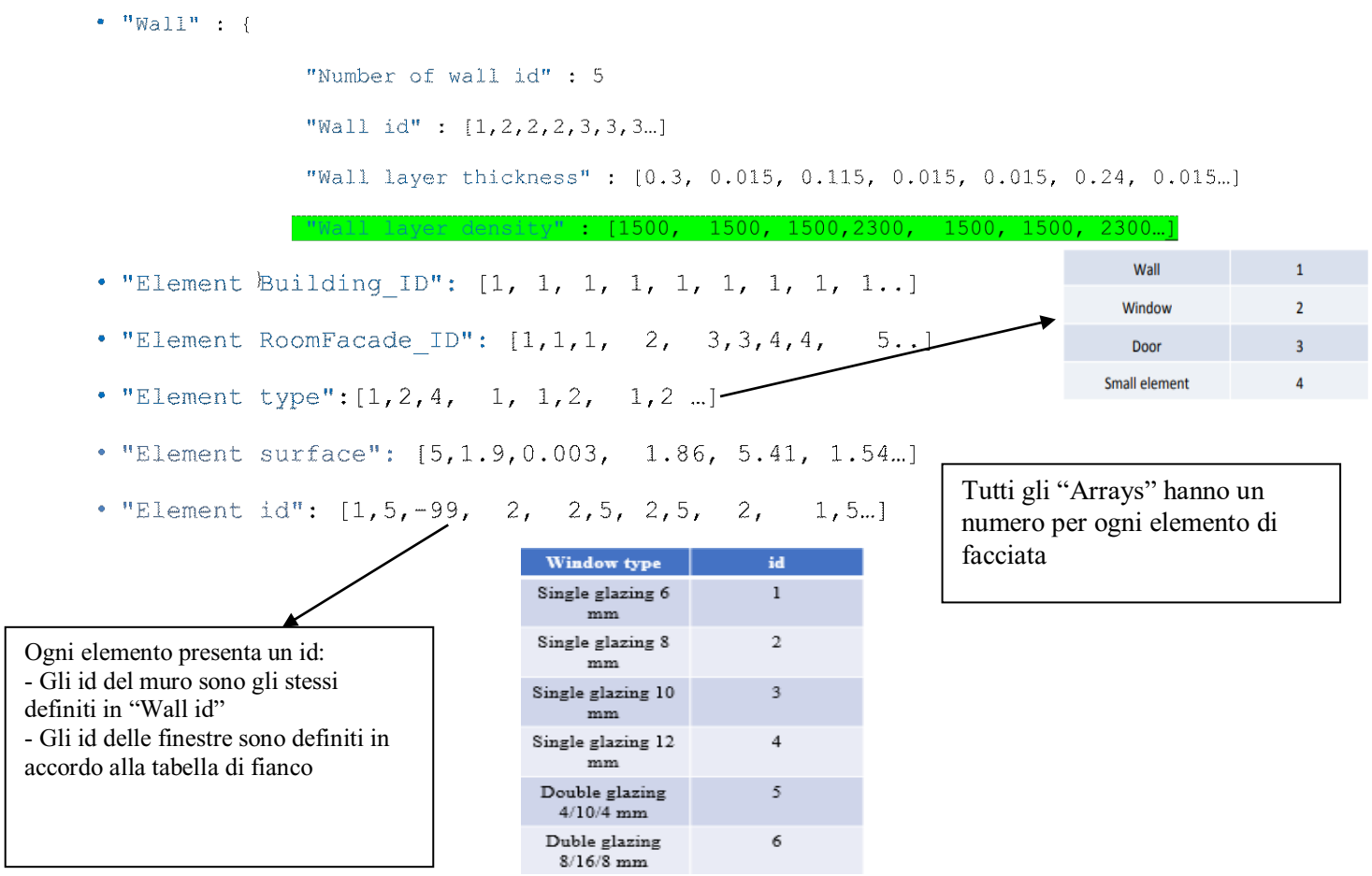



Fig. 29: Attributi dell’oggetto denominato “ElementsFacade”

Si intuisce quindi che i dati richiesti sono gli stessi previsti all’interno dei file CSV di input del modulo di calcolo originale, tranne che per una modifica sostanziale rispetto alla procedura di calcolo del comfort acustico descritta nel capitolo 3. Come detto nel paragrafo 5.2, nei modelli BIM degli edifici, soprattutto riferiti ad edifici vecchi da riqualificare, mancano diverse informazioni tra le quali, principalmente, il potere fonoisolante di pareti e finestre.
A tal fine, per facilitare l’integrazione con i modelli BIM degli edifici è stato aggiunto un oggetto, identificato dalla chiave “Wall” (Fig.35), con l’obiettivo di facilitare l’inserimento delle informazioni relative alle diverse composizioni delle pareti degli edifici, necessarie per il calcolo del potere fonisolante delle stesse a partire dalla massa superficiale, richiesta dal modulo acustico in assenza di Rw (come si vede dall’Eq .13).

$$R_{w,wall} = 37.5 \log(m') - 42 \quad \text{[dB]} \quad \text{Eq.13}$$

All'utente è richiesto, quindi, di dichiarare il numero di tipologie di muri presenti e, per ognuna di esse, inserire lo spessore e la densità di ciascuno strato che le compone così da ricavare la massa superficiale di ogni muro.

$$m' = \rho s \qquad [kg/m^2] \qquad \text{Eq.23}$$

Ad ogni tipologia deve inoltre essere assegnato un id, che dovrà poi essere inserito, similmente alle altre tipologie di elementi, nella corretta posizione dell'array "Element id", in modo che l'algoritmo valuti
correttamente il potere fonoisolante di ciascuna parete.
C'è però da dire che, i BIM raramente registrano i valori del potere fonoisolante dei vari elementi di facciata o delle partizioni e tantomeno quelli di densità dei vari elementi costituenti la stratigrafia delle murature. Per ovviare a tale inconveniente si può risalire, ricercando in letteratura, ad un muro che presenti stesse proprietà termiche e spessore (e quindi assumere con un certo grado di incertezza che le proprietà acustiche possano essere equivalenti), così da ricavarne la massa superficiale, e, tramite l'equazione 23, la densità. Questo concetto verrà mostrato in un caso di studio nel paragrafo 5.3.
Analogamente nel BIM potrebbero non esserci informazioni circa la tipologia delle finestre ma solo le relative proprietà termiche. Anche in questo caso si può ovviare ricercando in letteratura una finestra acusticamente equivalente così da risalire al "Window id". Questo concetto verrà mostrato in un caso di studio nel paragrafo 5.3.
Un ulteriore modifica agli input richiesti dal modulo di calcolo riguarda la caratterizzazione del rumore esterno, il quale, ora, potrà essere fornito solamente mediante mappature strategiche o misurazioni sul campo e non tramite una stima a partire dalla caratterizzazione delle fonte di rumore esterne.
Di seguito, rispettivamente nella Fig.30, è riportato un esempio dei 2 oggetti JSON inviati come risposta, anch'essi suddivisi in modo tale che vi sia corrispondenza con i file CSV di output del modulo di calcolo originale (SimulationReports.csv e SimulationResults.csv).


```
{
    "Buildings": {
        "Building Class": "A",
        "Building ID": 1,
        "Building KPI": 100,
        "Building Message": "High level of building acoustic comfort: retrofit
interventions on building envelope are not required",
        "Critical Room Facades Class": "A",
        "Critical Room Facades ID": 1,
        "District Class": "A",
        "District KPI": 100,
        "District Message": "High level of district acoustic comfort: retrofit
interventions on buildings are not required"
    },
    "Room Facades": {
        "Building Class": "A",
        "Building ID": 1,
        "Building KPI": 100,
        "District Class": "A",
        "District KPI": 100,
        "Door number": 0,
        "Dw": 32.6,
        "External Noise": 58.0,
        "Floor": 3,
        "Internal Noise": 25.4,
        "Room Class": "A",
        "Room Facade Class": "A",
        "Room Facade ID": 1,
        "Room ID": 1,
        "Rw": 33.2,
        "Small element number": 0,
        "T60": 0.5,
        "Wall number": 1,
        "Window number": 1
    }
}
```


Fig.30: File JSON di output

# CAPITOLO 5: CASO DI STUDIO: EDIFICIO POPOLARE IN MASSY (FRANCIA)

Fig. 31: Foto dell'edificio preso in esame

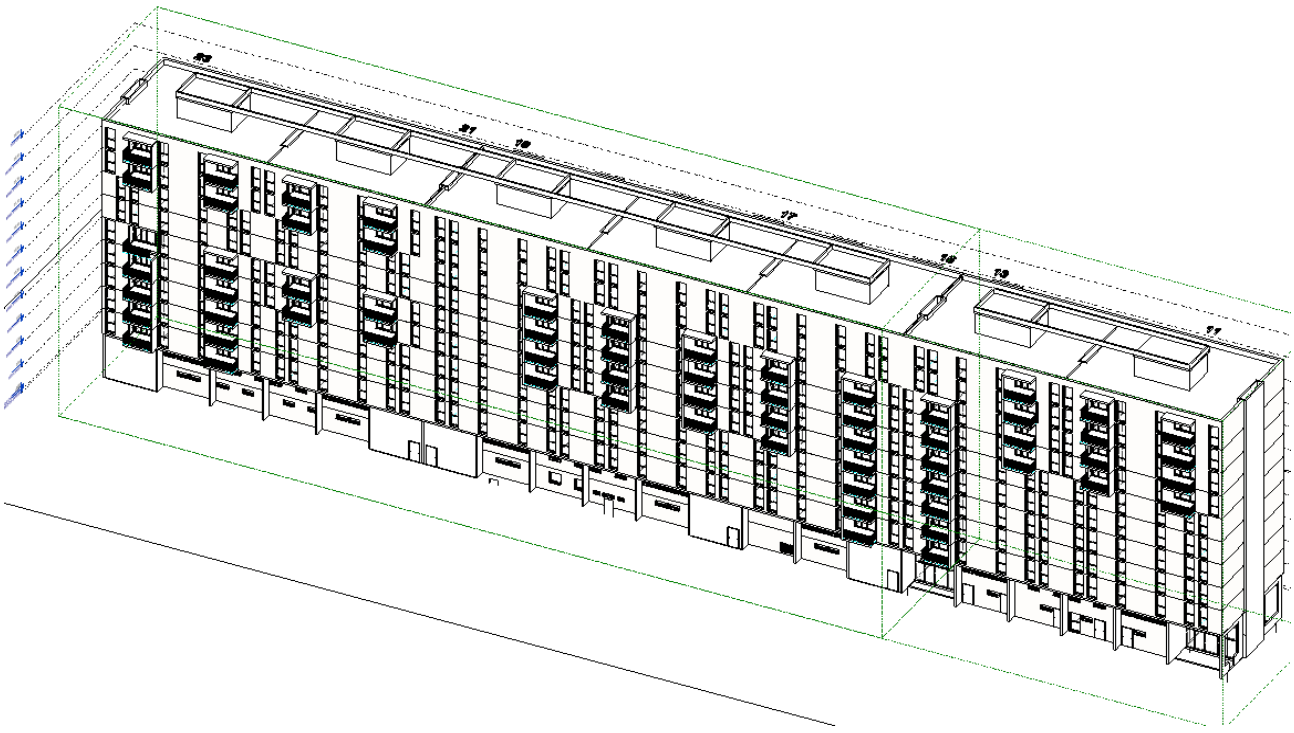


Fig. 32: Modello BIM dell'edificio preso in esame

E’ stato realizzato un caso di studio di un intero edificio da riqualificare situato in Massy, di cui era disponibile il modello BIM, per dimostrare l’applicabilità della nuova metodologia sviluppata nel capitolo 4 ed evidenziare le difficoltà. Dato che in questa fase preliminare i tool di integrazione, che renderebbero la comunicazione fra i modelli BIM e il modulo di calcolo automatica, non erano ancora stati sviluppati, i file JSON del caso di studio sono stati creati manualmente a partire dai dati preesistenti nel BIM in Revit (come descritto nel capitolo 4).

## 5.1 Descrizione dell'edificio

Si tratta di un edificio popolare situato in una zona residenziale di Massy (Francia). Nessuna industria, ferrovia o aeroporto si trova nelle vicinanze all'edificio analizzato; quindi, il rumore del traffico stradale è la principale fonte di rumore. L’edificio presenta un seminterrato, piano terra e 10 piani, in cui si trovano gli appartamenti, di 2,64 m di altezza ognuno. Né il seminterrato né il piano terra verranno considerati nell’analisi in quanto non sono abitati, con il piano terra che è ad uso commerciale. Inoltre verranno presi in considerazione solo i primi 2 piani, in quanto, oltre ad essere esposti a maggior rumore, i piani superiori sono identici al secondo piano. L’edificio non prevede un cappotto termico ma solamente un muro strutturale di 28 cm di spessore. Come detto nel paragrafo 3.3, nell’analisi vengono prese in considerazione solo le stanze con almeno una facciata esposta all’ambiente esterno, dette “Room Facade” (RF), e le stanze che sono occupate per più ore durante la giornata. Di conseguenza le stanze occupate solo temporaneamente come bagno, cucina, ripostiglio,… non vengono prese in considerazione in quanto ininfluenti nella valutazione del comfort acustico. Ne deriva che le uniche stanze considerate nell’analisi sono soggiorni e camere da letto.

Di seguito vengono riportate le planimetrie dei primi 2 piani e il conteggio delle Room Facade (RF):

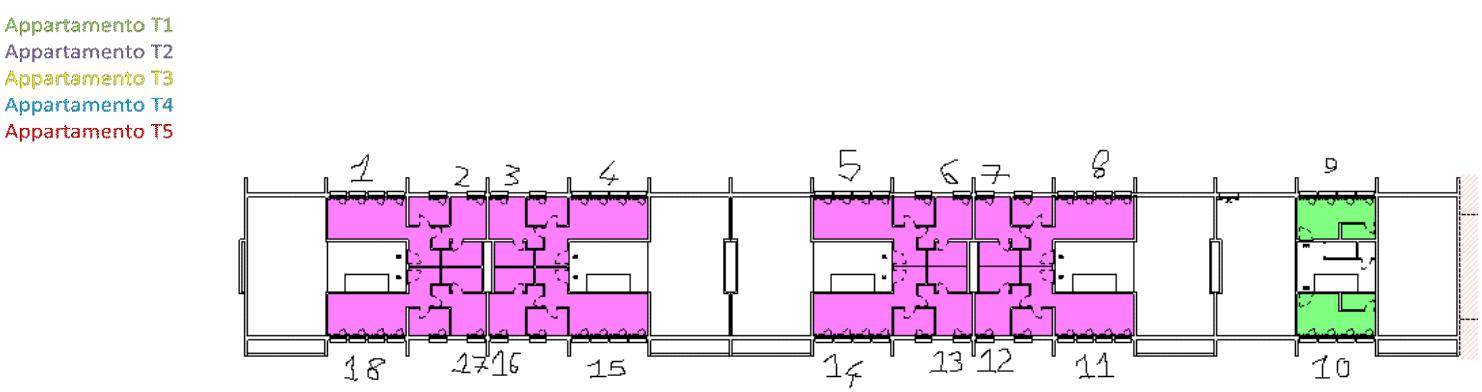



Fig. 33: Planimetria primo piano e conteggio delle RF

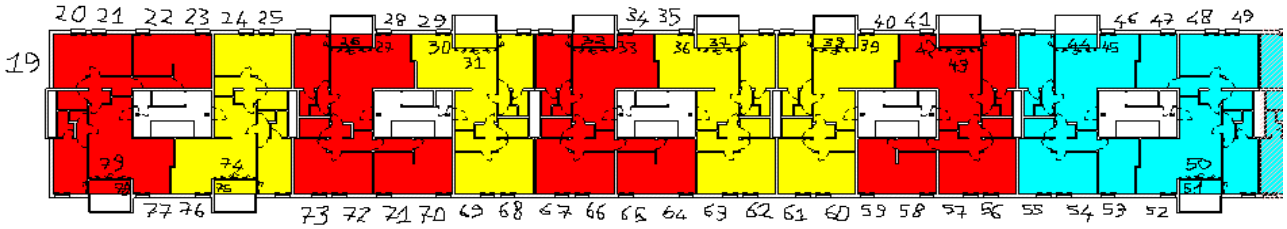


Fig. 34: Planimetria secondo piano e conteggio delle RF

Le zone in bianco sono rappresentative del pianerottolo in comune, in cui sono presenti le scale e l'ascensore. Inoltre nel secondo piano sono presenti dei balconi a ringhiera aperta di larghezza pari a 3,10 m e che si affacciano verso l'esterno di 2,34 m.
Le zone colorate corrispondono agli appartamenti, i quali sono di 5 tipologie:
- il primo piano prevede gli appartamenti di tipo T1 e T2, rispettivamente in verde e viola. Come si può notare nessuno di questi è provvisto di balcone.
- il secondo piano prevede gli appartamenti di tipo T3, T4 e T5 rispettivamente in giallo, azzurro e rosso. Ognuno di questi appartamenti prevede il soggiorno provvisto di balcone.
Di seguito vengono riportate le planimetrie delle 5 tipologie di appartamenti:

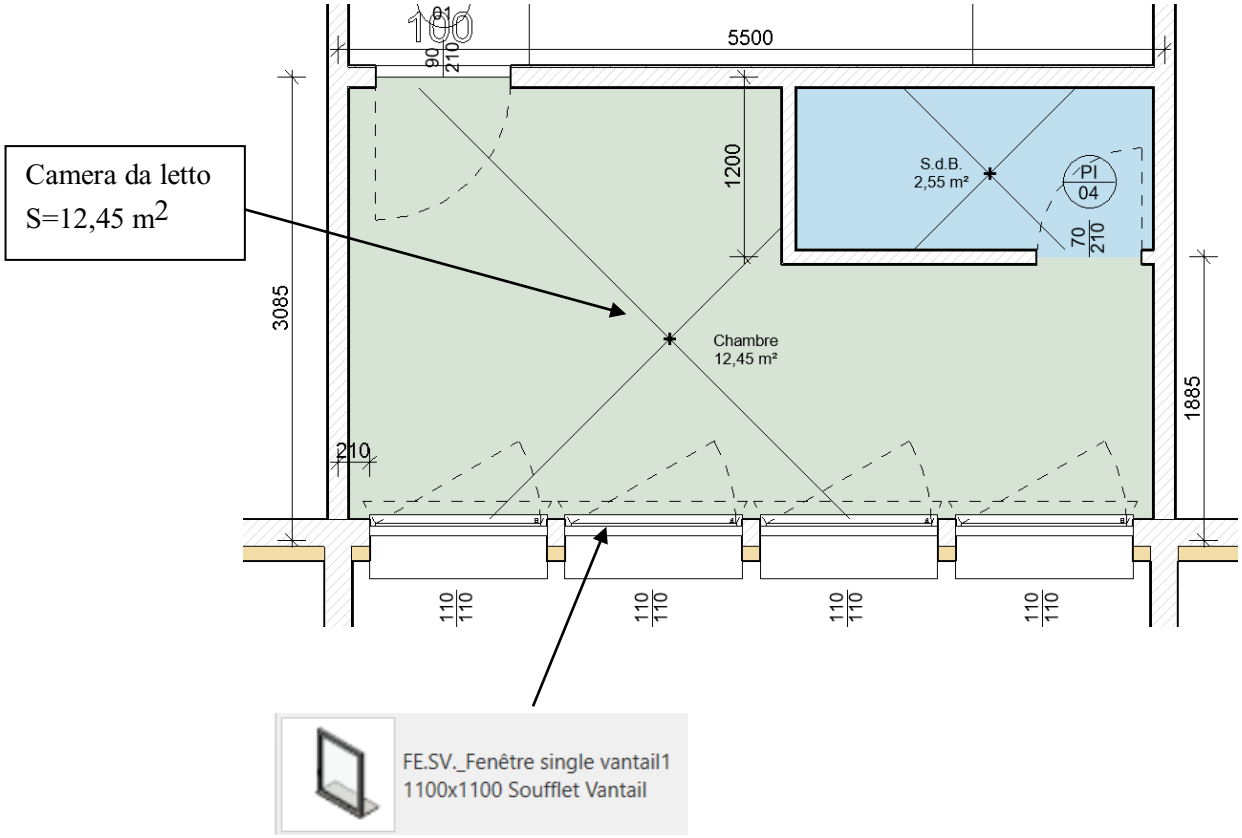



Fig.35: planimetria dell'appartamento di tipo T1

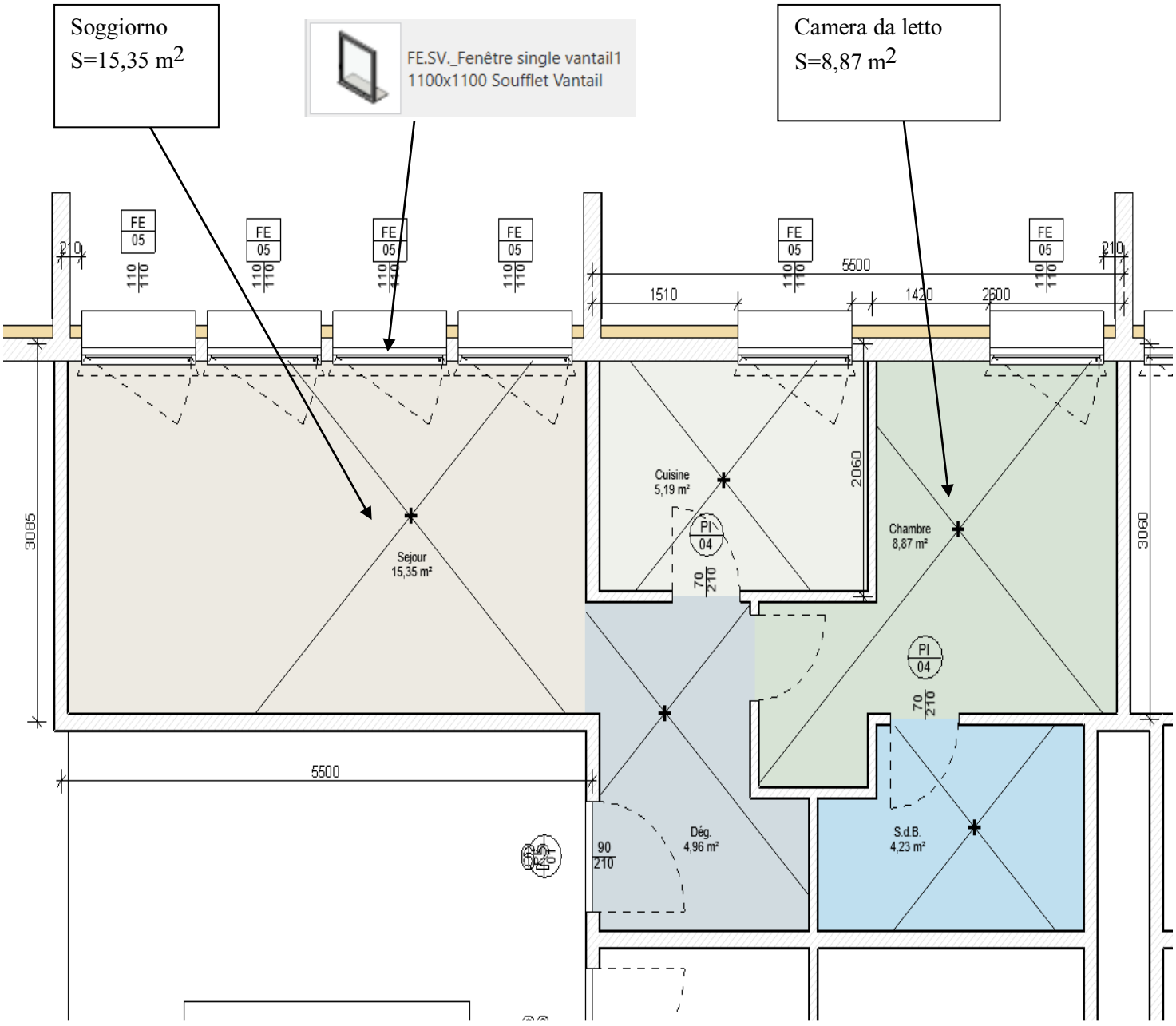



Fig. 36: planimetria dell'appartamento di tipo T2

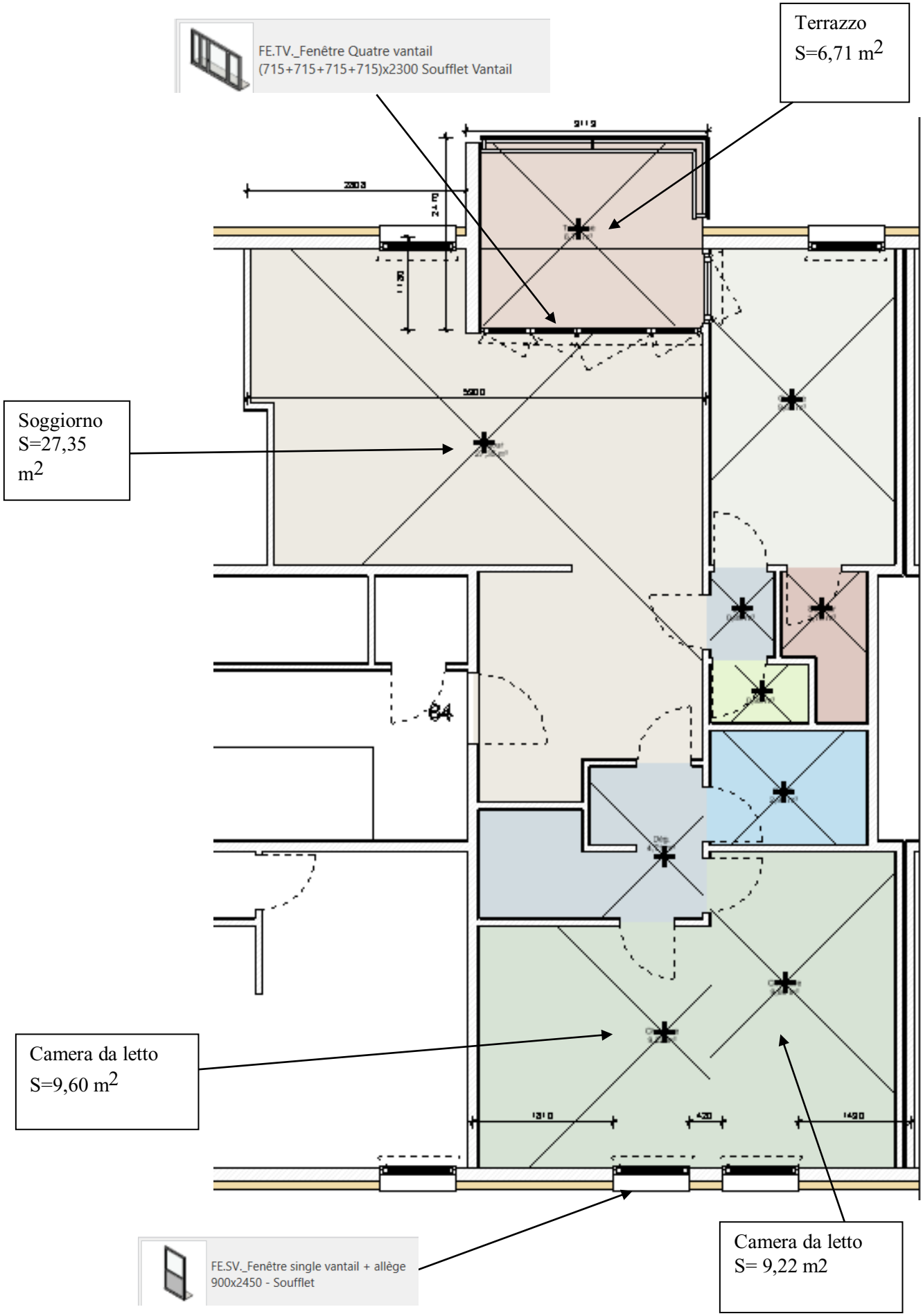



Fig.37: planimetria dell'appartamento di tipo T3

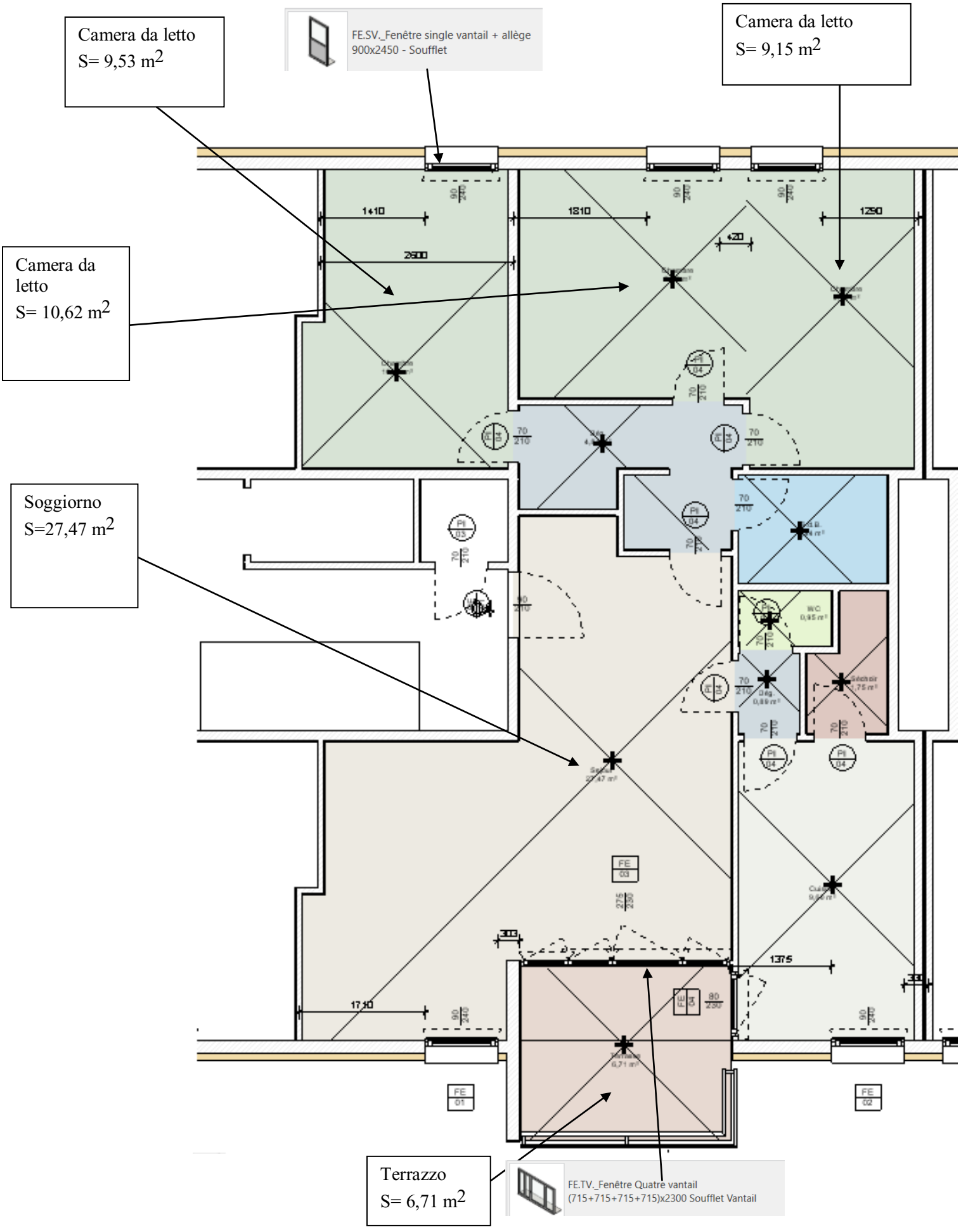



Fig.38: planimetria dell'appartamento di tipo T4

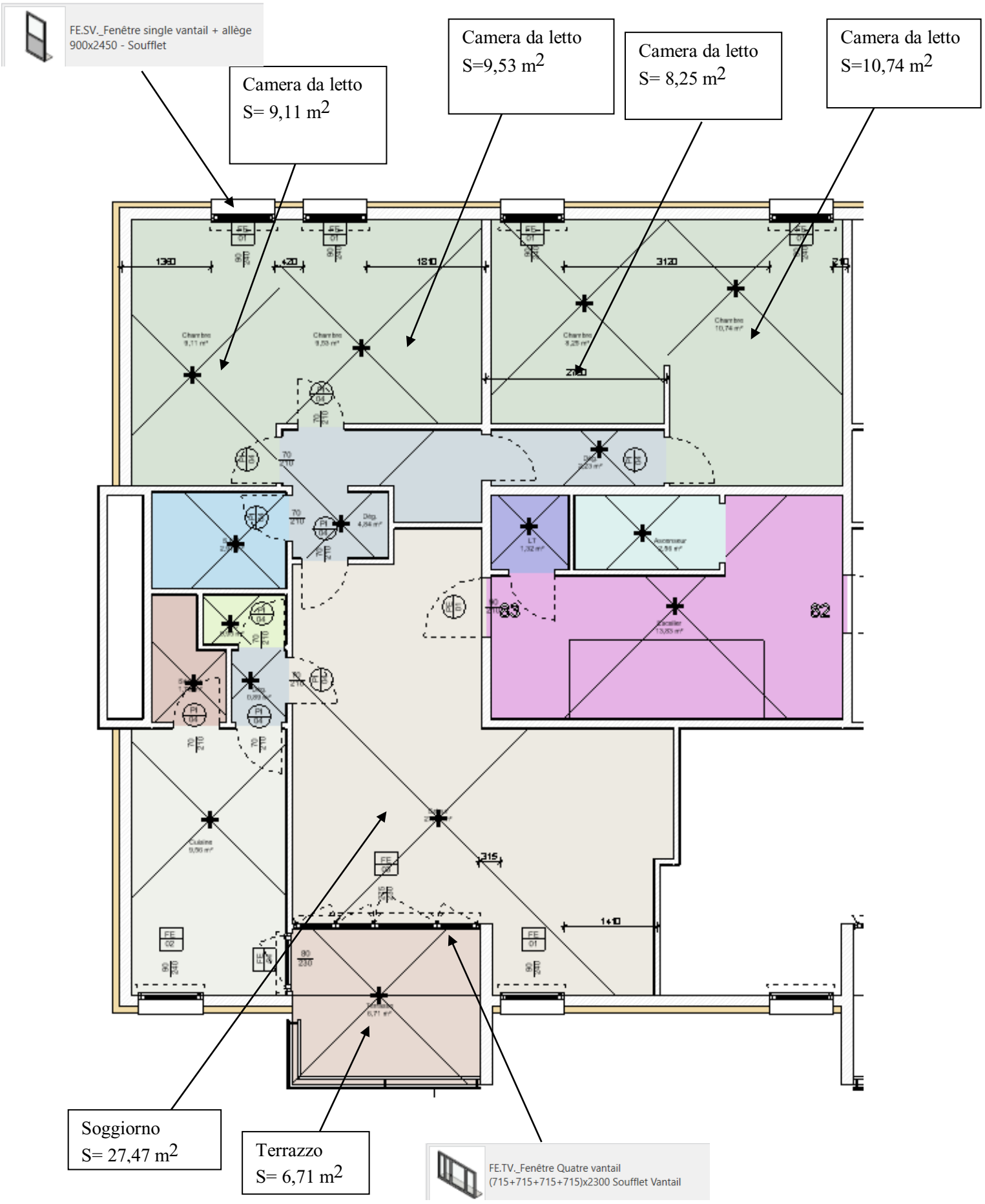



Fig.39: planimetria dell'appartamento di tipo T5

## 5.2 Determinazione del livello di rumore esterno

La mappatura acustica strategica è una classificazione dei limiti acustici delle aree del territorio di un comune in base alle caratteristiche delle sorgenti sonore ivi presenti ed alla loro destinazione d'uso stabilita. È stato quindi ricercata su Internet la mappatura acustica strategica di Massy (Fig.40). L'edificio analizzato è situato a "11 to 23 avenue de la Republique – 91300 Massy", ed è stato individuato in figura mediante una "X". Dalla figura si deduce che il rumore massimo a cui può essere esposto l'edificio è compreso tra 55 e 60 dB (zona gialla). Di conseguenza nell'analisi di comfort acustico è stato considerato un livello equivalente ponderato di pressione sonora esterna pari a 58 dB.

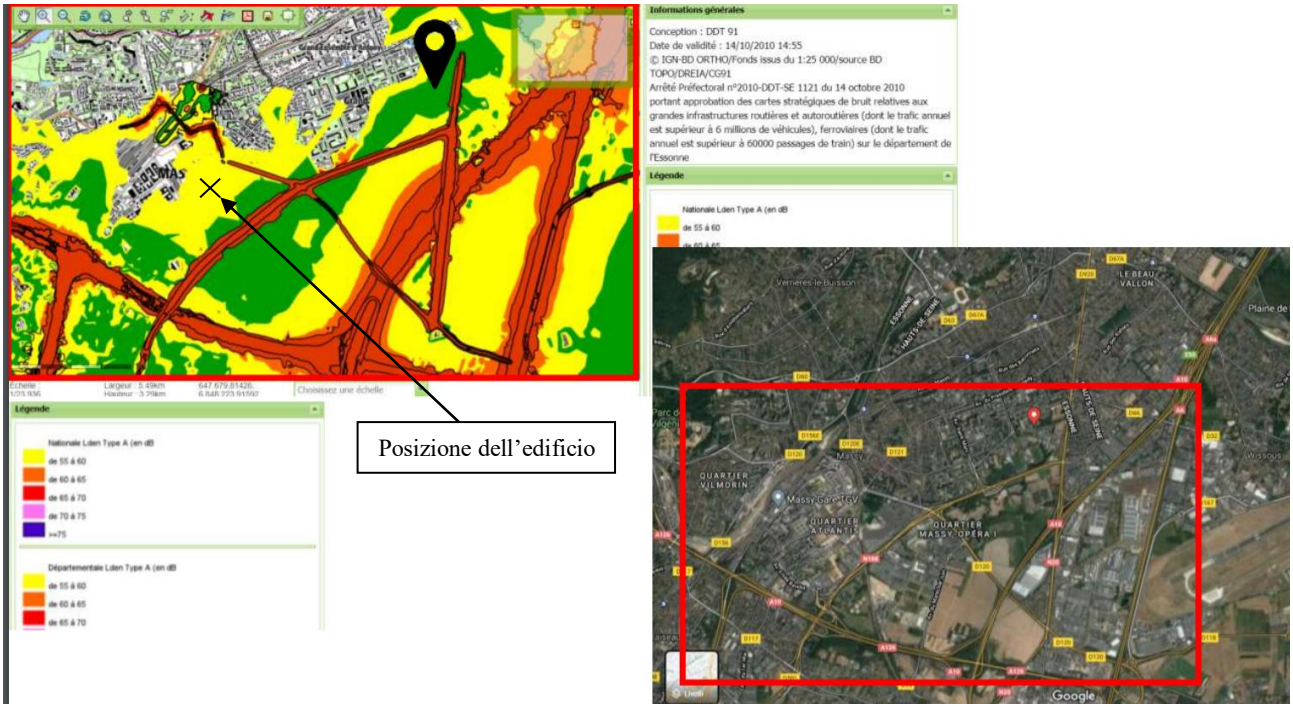



Fig. 40: Mappatura acustica strategica di Massy

## 5.3 Elementi costruttivi

In questa sezione verranno descritti nel dettaglio tutti gli elementi costruttivi che sono stati considerati nel modello di calcolo del comfort acustico.

**Muro:**

L'edificio prevede un muro strutturale da 28 cm, le cui caratteristiche riportate dal BIM sono mostrate in Fig.41.

Come si può osservare, il modello BIM non contiene informazioni circa il potere fonoisolante del muro considerato. Perciò, il potere fonoisolante del muro viene valutato a partire dalla massa superficiale (m'):

$$m' = \rho s \qquad [kg/m^2] \qquad \text{Eq.23}$$

dove ρ è la densità dello strato di muro considerato [kg/m$^3$] e s è lo spessore corrispondente[m]. Mentre lo spessore è previsto dal BIM, e pari a 28 cm, non è presente invece la densità. Tale inconveniente è risolvibile ricercando nei data sheets di materiali da costruzione, una muratura acusticamente equivalente, che presenti quindi coefficiente di scambio termico (U [W/m$^2$K]) e spessore simili, alla muratura presente nel BIM.

La muratura equivalente trovata nei data sheets presenta una massa superficiale di 260 kg/m$^2$, da cui, secondo l'Eq.23 e considerando lo spessore di 28 cm, ne deriva una densità di 867 kg/m$^3$ , che useremo per la nostra analisi. Ovviamente questo modo di procedere è affetto da incertezza e questo argomento sarà trattato nel capitolo 6.

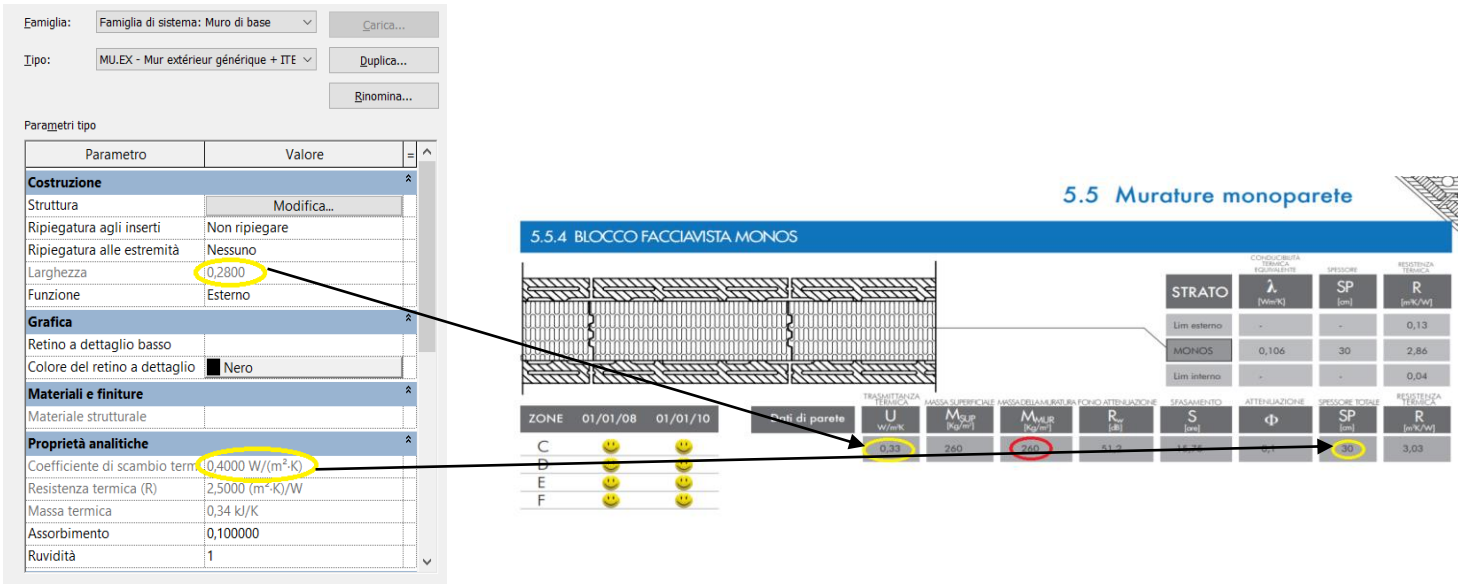



Fig. 41: Muro acusticamente equivalente a quello del nostro edificio

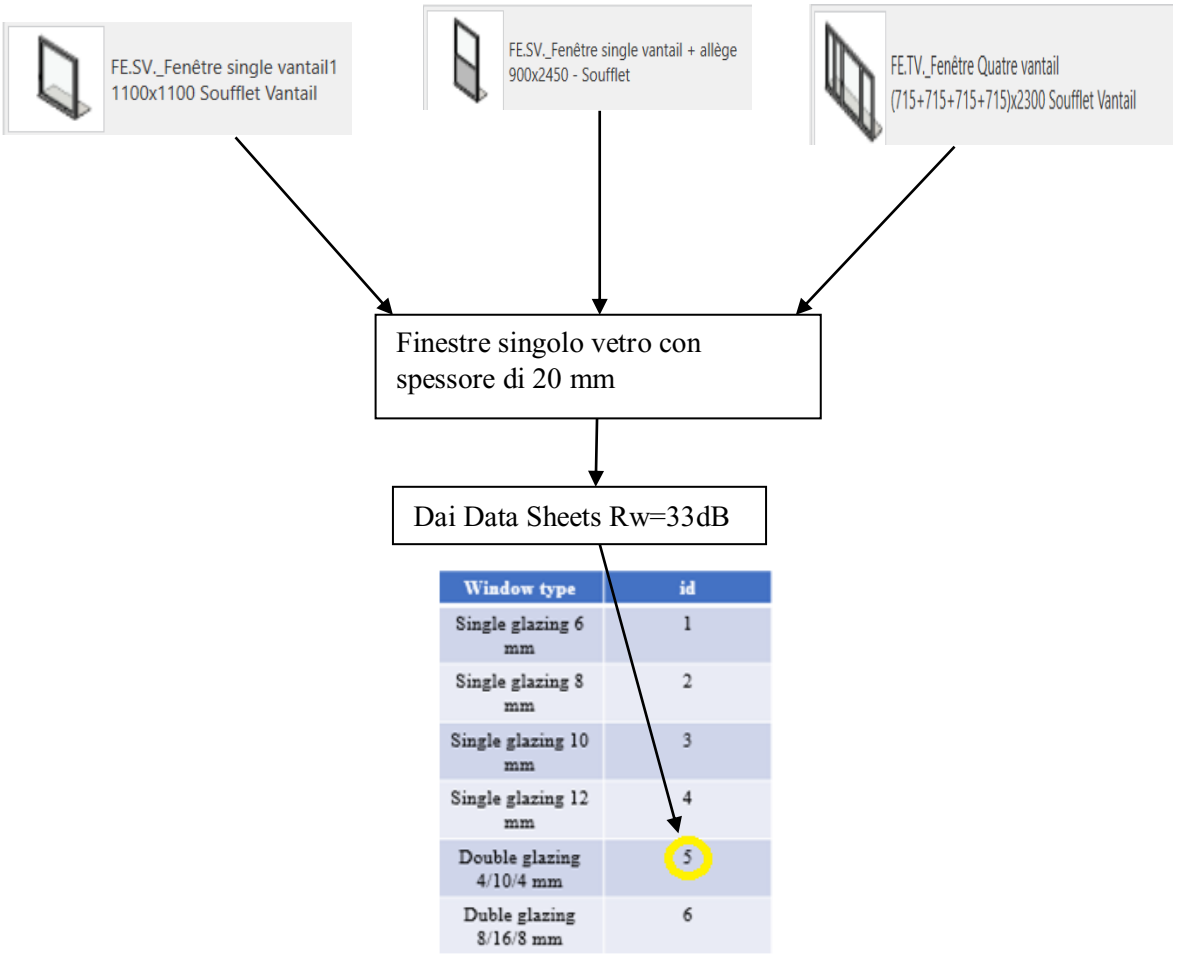
**Finestre:**

Le finestre dell'edificio sono tutte del tipo singolo vetro con spessore pari a 20 mm. Tuttavia queste finestre non rientrano tra le tipologie previste per costruire il file JSON come si nota dalla Fig.42:

| Window type | id |
|---|---|
| Single glazing 6 mm | 1 |
| Single glazing 8 mm | 2 |
| Single glazing 10 mm | 3 |
| Single glazing 12 mm | 4 |
| Double glazing 4/10/4 mm | 5 |
| Duble glazing 8/16/8 mm | 6 |

Fig. 42: Codifica delle varie tipologie di finestre

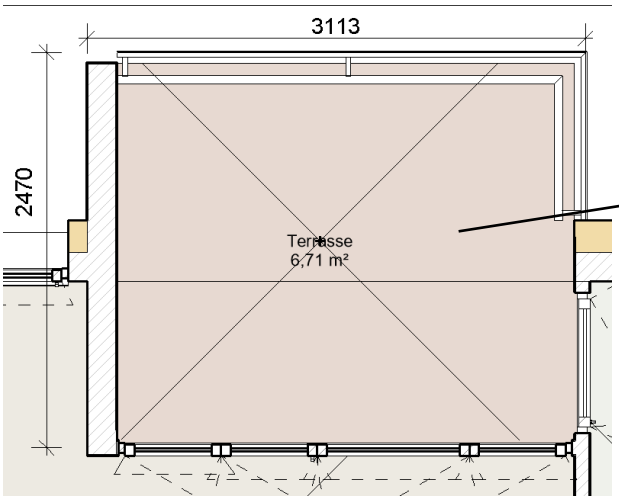
Tuttavia ricercando nei data sheets, si è trovato che ad una finestra singolo vetro, di spessore pari a 20 mm, corrisponde un Rw pari a 33 dB, che è lo stesso della finestra doppio vetro 4/10/4 mm. Di conseguenza sfruttando questa equivalenza di proprietà acustiche si inserisce un id pari a 5 (Fig.43)




| Window type | id |
|---|---|
| Single glazing 6 mm | 1 |
| Single glazing 8 mm | 2 |
| Single glazing 10 mm | 3 |
| Single glazing 12 mm | 4 |
| Double glazing 4/10/4 mm | 5 |
| Duble glazing 8/16/8 mm | 6 |

Fig.43: Procedimento seguito per risalire all'id delle finestre

**Terrazzo:**



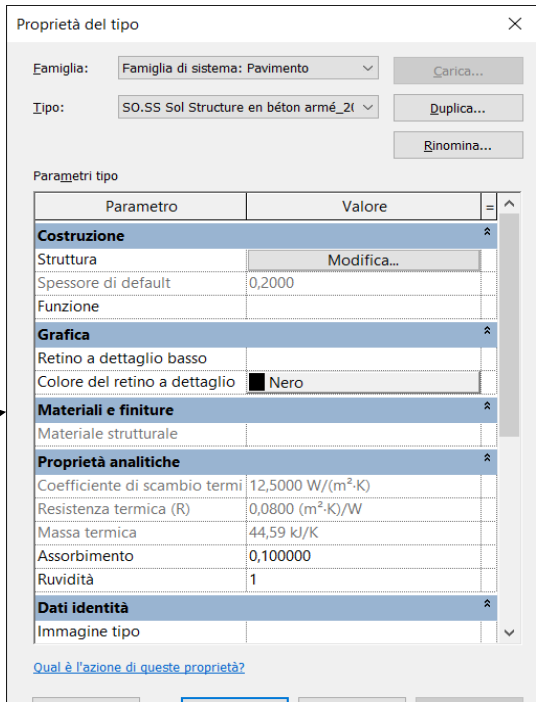




Fig.44: planimetria del terrazzo e relative caratteristiche della pavimentazione riportate nel BIM

La pavimentazione del terrazzo è costituita da cemento armato la cui densità è pari a 2400 kg/m$^3$ ,e, quindi, simile a quella del vetro comune. Pertanto alla voce “RF_Balcony material” verrà inserito un id pari a 5.

| | |
|---|---|
| Plaster | 1 |
| Soundproof plaster | 2 |
| Wood | 3 |
| Rough concrete | 4 |
| Glass sheet | 5 |

Fig.45: id inserito alla voce “RF_Balcony material”

A partire dai dati raccolti nel BIM è stato costruito manualmente il file JSON, come descritto nella sezione 4.2.2,  da inviare al DIM server:


"RoomFacade": {
"Rooms": {
"Room use": [2, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 2,1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2],
"Room volume" : [43.6, 20.6, 20.6, 43.6, 43.6, 20.6, 20.6, 43.6, 35.8, 35.8, 43.6, 20.6, 20.6, 43.6, 43.6, 20.6, 20.6, 43.6,24.1, 25.2, 21.8, 28.4, 24.34, 25.34, 24.1, 25.2, 21.8, 28.4, 24.34, 25.34, 24.1, 25.2, 21.8, 28.4, 24.34, 25.34, 24.34, 25.34, 24.1, 25.2, 21.8, 28.4, 72.5, 72.5, 28, 25.2, 24.2, 28, 25.2, 24.2, 72.5, 72.2, 72.2, 72.5, 72.2, 72.5, 72.2, 72.5],
"Room floor area" : [5.35, 8.87, 8.87, 15.35, 15.35, 8.87, 8.87, 15.35, 12.45, 12.45, 15.35, 8.87, 8.87, 15.35, 15.35, 8.87, 8.87, 15.35,9.11, 9.53, 8.25, 10.74, 9.22, 9.6, 9.11, 9.53, 8.25, 10.74, 9.22, 9.6, 9.11, 9.53, 8.25, 10.74, 9.22, 9.6, 9.22, 9.6, 9.11, 9.53, 8.25, 10.74, 27.47, 27.47, 10.62, 9.53, 9.15, 10.62, 9.53, 9.15, 27.47, 27.35, 27.35, 27.47, 27.35, 27.47, 27.35, 27.47],
"Room shape": [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1,1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 3, 3, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3],
"Room floor": [2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2,3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3]
},
"District_Land use category" :  2,
"District_Total number of buildings" :  1,
"Building_ID":[1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1],
"Building_Total number of room facades of each building" :  79,
"RoomFacade_ID": [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79],
"Room_ID": [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 43, 43, 44, 44, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 51, 51, 52, 52, 52, 53, 53, 53, 54, 54, 54, 55, 55, 55, 56, 56, 56, 57, 57, 57, 58, 58, 58],
"RF_Surface" : [14,6.9,6.9,14,14,6.9,6.9,14,7.9,7.9,14,6.9,6.9,14,14,6.9,6.9,14,11.5, 6.6, 8.7, 7.3, 7.3, 7.2, 7, 6.6, 8.7, 7.3, 7.3, 7.2, 7, 6.6, 8.7, 7.3, 7.3, 7.2, 7, 7.2, 7, 6.6, 8.7, 7.3, 7.3, 7.9, 3.1, 7.1, 7.9, 3.1, 7.1, 6, 7.7, 6.7, 6, 7.7, 6.7, 6.3, 3.1, 7.9, 7.7, 3.1, 7.9, 7.7, 3.1, 7.9, 6.3, 3.1, 7.9, 7.7, 3.1, 7.9, 6.3, 3.1, 7.9, 7.7, 3.1, 7.9, 6.3, 3.1, 7.9],
"RF_Strategic Noise Mapping value" : [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
"RF_Balcony material" : [99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99,-99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, 1, 1, -99, 1, 1, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, 1, 1, -99, 1, 1, -99, 1, 1, -99, 1, 1, -99, 1, 1, -99, 1, 1, -99, 1, 1, -99, 1, 1],
"RF_Balcony width" : [-99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99,-99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, 3, 3, -99, 3, 3, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, -99, 3, 3, -99, 3, 3, -99, 3, 3, -99, 3, 3, -99, 3, 3, -99, 3, 3, -

99, 3, 3, -99, 3, 3],
"External equivalent sound pressure level" : [58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58, 58]
},
"ElementFacade": {
"Wall" : {
"Number of wall id" : 2,
"Wall id" : [1,2],
"Wall layer thickness" : [0.28,0.18],
"Wall layer density" :[867,867]
},
"Element Building_ID" : [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1],
"Element RoomFacade_ID":
[1,1,1,1,1,2,2,3,3,4,4,4,4,4,5,5,5,5,5,6,6,7,7,8,8,8,8,8,9,9,9,9,9,10,10,10,10,10,11,11,11,11,11,12,12,13,13,14,14,14,14,14,15,15,15,15,15,16,16,17,17,18,18,18,18,18,19,20,20,21,21,22,22,23,23,24,24,25,25,26,26,27,27,28,28,29,29,30,30,31,31,32,32,33,33,34,34,35,35,36,36,37,37,38,38,39,39,40,40,41,41,42,42,43,43,44,44,45,46,46,47,47,48,49,49,50,50,51,51,52,52, 53,53, 54,54, 55,55, 56,56, 57, 58, 58,59,59,60,61,61,62,62,63,64,64,65,65,66,67,67,68,68, 69, 70,70,71,71,72,73,73, 74,74, 75, 76,76, 77,77, 78, 79,79],
"Element type": [1, 2, 2, 2, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 2, 2, 2, 1, 2, 2, 2, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 2, 2, 2, 1, 2, 2, 2, 2, 1, 2, 2, 2, 2, 1, 2, 2, 2, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 2, 2, 2, 1, 2, 2, 2, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 2, 2, 2,1, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 2],
"Element surface": [9.2, 1.2, 1.2, 1.2, 1.2, 5.7, 1.2, 5.7, 1.2, 9.2, 1.2, 1.2, 1.2, 1.2, 9.2, 1.2, 1.2, 1.2, 1.2, 5.7, 1.2, 5.7, 1.2, 9.2, 1.2, 1.2, 1.2, 1.2, 9.7, 1.2, 1.2, 1.2, 1.2, 9.7, 1.2, 1.2, 1.2, 1.2, 9.2, 1.2, 1.2, 1.2, 1.2, 5.7, 1.2, 5.7, 1.2, 9.2, 1.2, 1.2, 1.2, 1.2, 9.2, 1.2, 1.2, 1.2, 1.2, 5.7, 1.2, 5.7, 1.2, 9.2, 1.2, 1.2, 1.2, 1.2,11.6, 4.4, 2.2, 6.6, 2.2, 4.7, 2.2, 4.7, 2.2, 4.8, 2.2, 4.8, 2.2, 4.4, 2.2, 6.6, 2.2, 4.7, 2.2, 4.7, 2.2, 4.8, 2.2, 4.8, 2.2, 4.4, 2.2, 6.6, 2.2, 4.7, 2.2, 4.7, 2.2, 4.8, 2.2, 4.8, 2.2, 4.8, 2.2, 4.8, 2.2, 4.4, 2.2, 6.6, 2.2, 4.7, 2.2, 4.7, 2.2, 1.32, 6.6, 3.1, 4.9, 2.2, 1.32, 6.6, 3.1, 4.9, 2.2, 3.8, 2.2, 6, 2.2, 4, 2.2, 3.8, 2.2, 6, 2.2, 4, 2.2, 4.1, 2.2, 3.1, 1.3, 6.6, 5.5, 2.2, 3.1, 1.3, 6.6, 5.5, 2.2, 3.1, 1.3, 6.6, 4.1, 2.2, 3.1, 1.3, 6.6, 5.5, 2.2, 3.1, 1.3, 6.6, 4.1, 2.2, 3.1, 1.3, 6.6, 5.5, 2.2, 3.1, 1.3, 6.6, 4.1, 2.2, 3.1, 1.3, 6.6],
"Element id": [1, 5, 5, 5, 5, 1, 5, 1, 5, 1, 5, 5, 5, 5, 1, 5, 5, 5, 5, 1, 5, 1, 5, 1, 5, 5, 5, 5, 1, 5, 5, 5, 5, 1, 5, 5, 5, 5, 1, 5, 5, 5, 5, 1, 5, 1, 5, 1, 5, 5, 5, 5, 1, 5, 5, 5, 5, 1, 5, 1, 5, 1, 5, 5, 5, 5,1, 1, 5, 1, 5, 1, 5, 1, 5, 1, 5, 1, 5, 1, 5, 1, 5, 1, 5, 1, 5, 1, 5, 1, 5, 1, 5, 1, 5, 1, 5, 1, 5, 1, 5, 1, 5, 1, 5, 1, 5, 1, 5, 1, 5, 2, 1, 5, 1, 5, 2, 1, 5, 1, 5, 1, 5, 1, 5, 1, 5, 1, 5, 1, 5, 1, 5, 2, 1, 5, 1, 5, 2, 1, 5, 1, 5, 2, 1, 5, 1, 5, 2, 1, 5, 1, 5, 2, 1, 5, 1, 5, 2, 1, 5, 1, 5, 2, 1, 5, 1, 5, 2, 1, 5]
}

## 5.4 Comfort acustico dell'edificio

Dopo aver raccolto manualmente i dati dal BIM e noti i livelli di pressione sonora equivalente ponderata esterna dalla mappatura acustica strategica, è stato costruito manualmente il file JSON come descritto nel sottoparagrafo 4.2.2. A questo punto tale file JSON è stato inviato al DIM server per la simulazione. Il file JSON in uscita, tra i vari output, ha fornito una simulazione dei livelli di pressione sonora equivalente ponderata interna di ogni elemento di facciata (RF) e i relativi KPI "As-is", fornendo così una stima del comfort acustico dell'edificio. Il KPI dell'edificio risulta pari a 100%, e risulta pari al 100% anche per ogni stanza affacciata all'esterno. Ciò significa che non sono necessari interventi di ristrutturazione sull'edificio, per migliorare il comfort acustico. Un eventuale intervento di ristrutturazione potrebbe prevedere balconi non più con ringhiere ma con parapetti, ma deriverebbe solamente da scopi prettamente estetici e non di comfort acustico.

Per un'analisi dettagliata del livello di rumore interno, consideriamo il primo piano e numeriamo le stanze che contengono almeno una Room Facade, come riportato in Fig. 46.

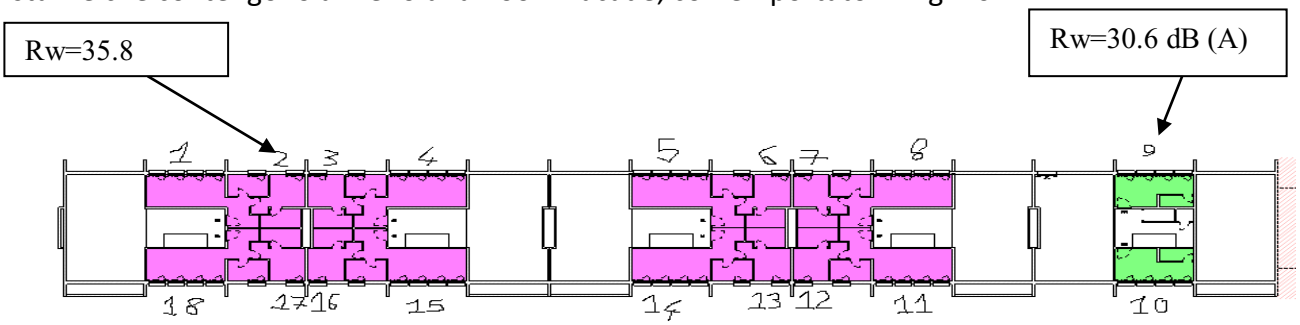



Fig.46: Numerazione stanze primo piano e Rw delle stanze più e meno rumorose

La mappatura del livello di pressione sonora equivalente ponderata interna è mostrata in Fig.47.

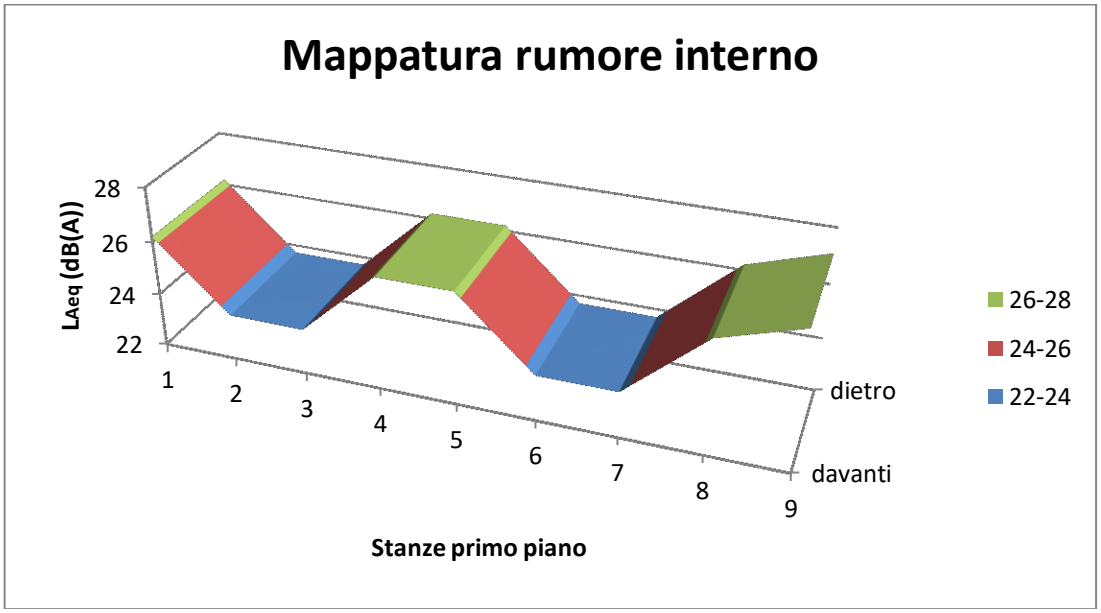



Fig.47: Mappatura del rumore interno sulle stanze del primo piano

Dato che il modulo acustico calcola il livello di pressione sonora equivalente ponderata interna a livello di Room Facade (RF), per le stanze che presentano più di una RF è stata effettuata una media ponderata sulle aree per trovare un valore unico a livello di stanza.
Come si può notare dalla Fig.47, le stanze più rumorose sono le camere 9 e 10. Questo risultato ci è confermato anche dal Rw di tali stanze, mostrato in Fig. 46. Le stanze meno rumorose sono le camere dell'appartamento T2 con una sola finestra.
Dato che le stanze più rumorose non superano i 28 dB(A), abbiamo la conferma che il KPI è del 100% per ogni stanza (Fig.48)

| Type of space | Class A | Class B | Class C | Class D | Class E |
|---|---|---|---|---|---|
| Bedroom | $L_{Aeq} \leq 30$ | $30 < L_{Aeq} \leq 32.5$ | $32.5 < L_{Aeq} \leq 35$ | $35 < L_{Aeq} \leq 40$ | $L_{Aeq} > 40$ |

Fig.48: Classificazione delle camere da letto sulla base del livello di pressione sonora equivalente ponderata interna

Gli stessi ragionamenti sono stati applicati alla facciata anteriore e posteriore del secondo piano, con i risultati che sono mostrati nelle figure seguenti.

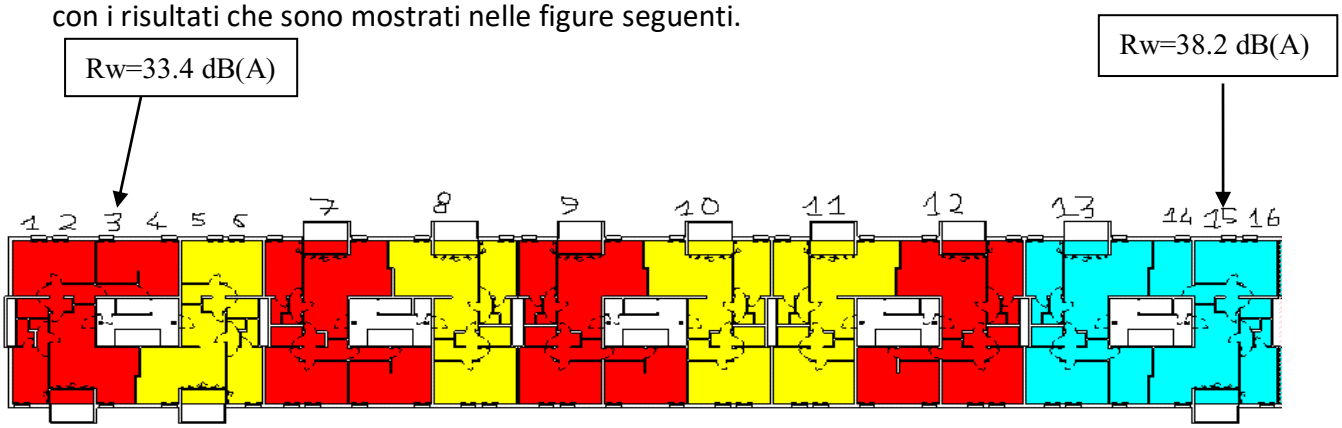



Fig.49: Numerazione stanze facciata posteriore del secondo piano e Rw delle stanze più e meno rumorose

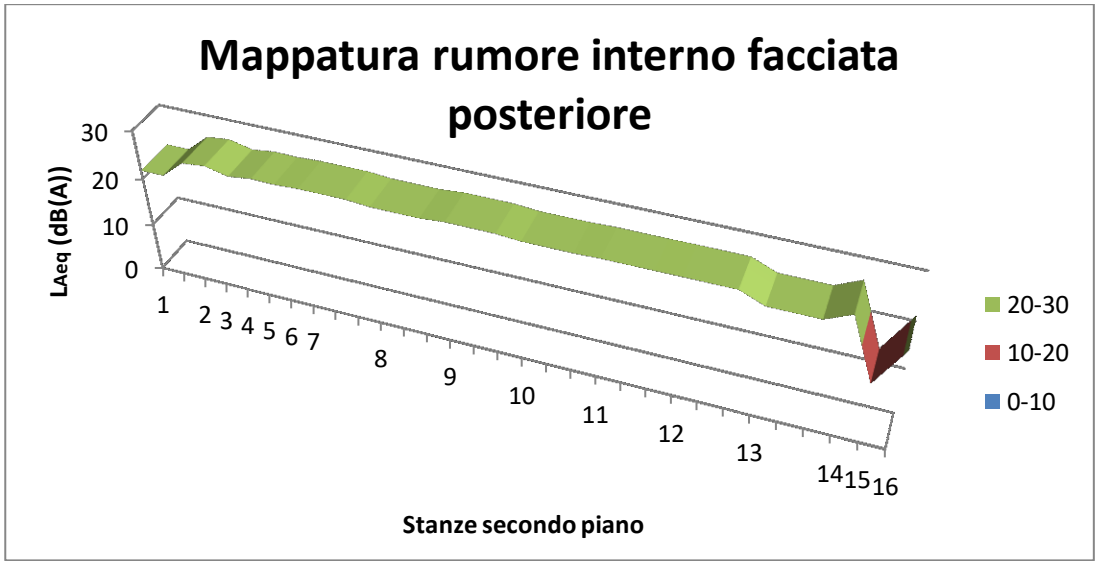



Fig.50: Mappatura rumore interno sulle stanze del secondo piano nella facciata posteriore

Dalla Fig.50 si osserva che la stanza meno rumorosa è la camera 15, mentre quella più rumorosa è la camera 3.

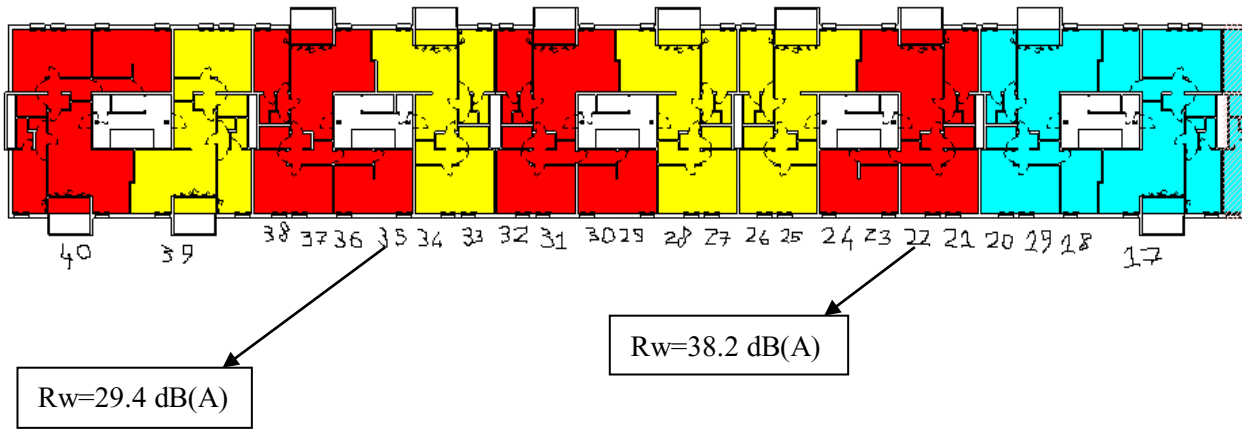



Fig.51: Numerazione stanze facciata anteriore del secondo piano e Rw delle stanze più e meno rumorose

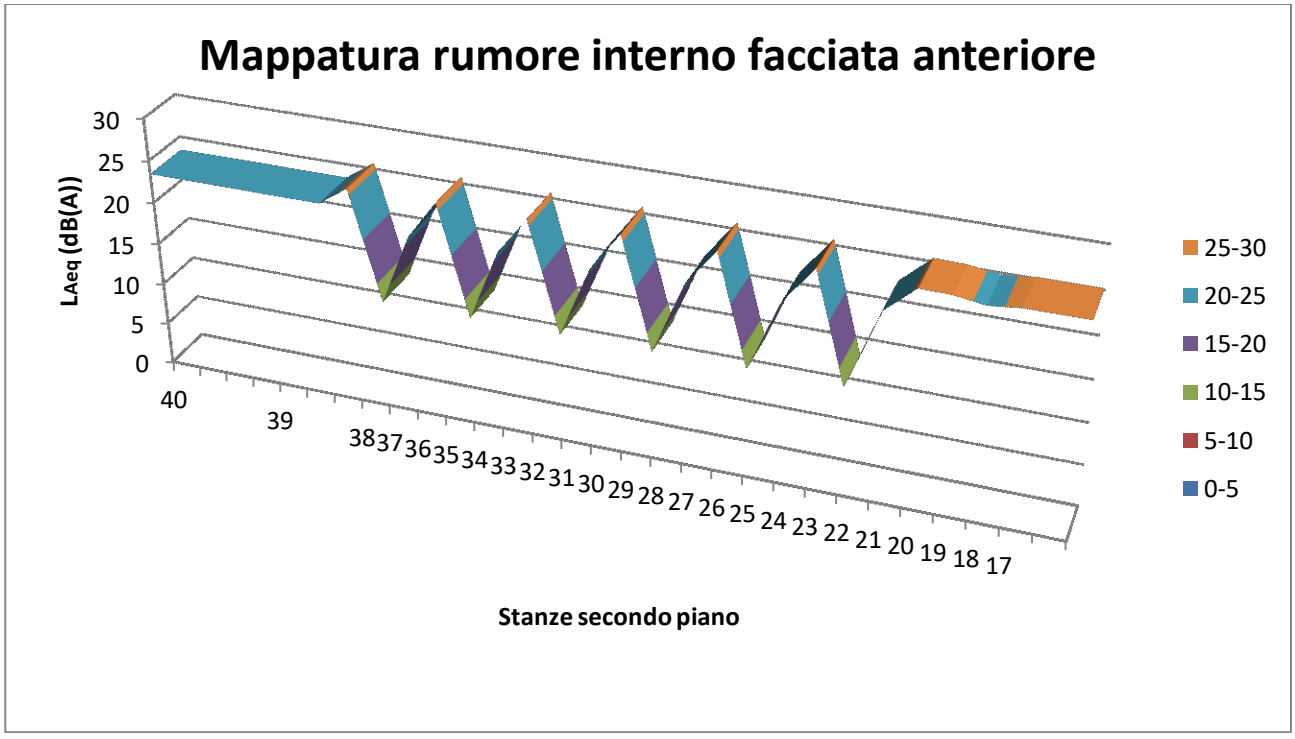



Fig.52: Mappatura rumore interno sulle stanze del secondo piano nella facciata anteriore

Dalla Fig. 52 si osserva che le stanze più rumorose sono la prima camera da dx dell'appartamento T5.

# CAPITOLO 6: ANALISI DI SENSIBILITA'E INCERTEZZA

In questo capitolo si vuole verificare l'affidabilità della nuova procedura, descritta nel capitolo 4, se usata per valutare il comfort acustico di un edificio. Per fare questo è necessario effettuare un'analisi di sensibilità e incertezza.

## 6.1: Analisi di sensibilità e metodo Monte Carlo

Le analisi di sensibilità sono molto importanti per verificare la "robustezza" di un risultato, specialmente nel caso in cui metodi, modelli, valori delle variabili non sono noti con certezza, come nel nostro caso, valutando così il rischio associato a considerare tale risultato come esatto. Mediante l'analisi di sensibilità, si va a valutare quanto ogni input del modello contribuisce all'incertezza di un risultato mediante degli indici di sensibilità, arrivando a definire quali sono gli input più critici che dovranno quindi essere valutati più attentamente prima di prendere una decisione.
Il principio di base del metodo Monte Carlo è quello di perturbare le variabili in input al modello di calcolo delle variabili dipendenti in output al modello assegnando una perturbazione di tipo statistico e quindi valutare la variazione dell'output. Osservando la distribuzione della variazione dell'output, associata alla variazione dei diversi input, è possibile valutare la sensibilità del modello ad ogni input. In Fig. 53 è rappresentato uno schema per la determinazione dell'incertezza di una variabile dipendente Y che dipende tramite la funzione f dalle n variabili indipendenti $X_i$. Se le n variabili indipendenti vengono date in input al modello Y = f(X) come distribuzioni di valor medio $x_i$ e deviazione standard $u(x_i)$, è possibile determinare l'output del modello rappresentato dal valor medio di Y, ovvero y, e deviazione standard u(y).

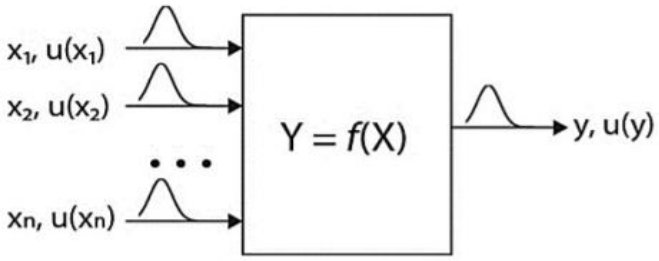



Fig.53: Schematizzazione dell'analisi Monte Carlo per la determinazione dell'incertezza di un modello Y=f(X)

Gli elementi principali della tecnica possono essere descritti come segue:

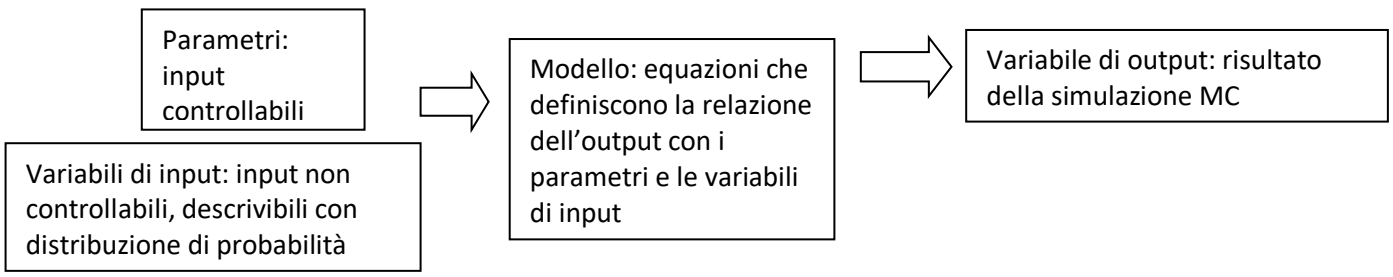



Fig.54: Elementi principali coinvolti nella simulazione Monte Carlo

La convenienza di questo metodo deriva dal fatto che una soluzione analitica diretta del problema, che consente direttamente di calcolare l'output al variare delle variabili di input, può essere costosa o impossibile. Inoltre la potenzialità dell'analisi di sensibilità con il metodo Monte Carlo è la possibilità di perturbare tutte le variabili in input contemporaneamente, tuttavia l'analisi diventerebbe eccessivamente lunga. Di conseguenza è fondamentale individuare le variabili veramente rilevanti.
La procedura generale per valutare la sensibilità delle variabili di input prevede di:

1) Individuare le variabili di input rilevanti per l'analisi, questo passaggio è uno dei più critici della procedura in quanto la qualità del risultato finale dipende criticamente dalla sua accuratezza. Sebbene uno dei punti di forza della simulazione MC sia consentire l'inclusione di un gran numero di parametri per rappresentare la complessità del problema, si dovrebbe cercare il compromesso più appropriato tra accuratezza e semplicità di implementazione. Pertanto, è opportuno selezionare solo le variabili realmente rilevanti per l'analisi.
2) Definire una distribuzione di probabilità per ogni variabile di input, quindi valor medio e deviazione standard nel caso la distribuzione possa essere considerata di tipo casuale normale (ovvero una distribuzione di probabilità gaussiana). La distribuzione può essere stimata sulla base di dati quantitativi oppure può essere definita in modo soggettivo tramite conoscenze pregresse
3) Generazione di almeno $10^4$ valori casuali per ogni variabile di input in esame secondo la distribuzione di probabilità precedentemente definita
4) Perturbazione del modello di calcolo fornendo come input la distribuzione di probabilità di una delle variabili, mantenendo le altre variabili inalterate
5) Calcolare la varianza $V(x_i)$, pari a $u(x_i)^2$, e valor medio della distribuzione in output correlata alla perturbazione della variabile $x_i$
6) Ripetere i passaggi 4) e 5) per tutte le variabili di input
7) Perturbare il modello con tutte le variabili di input contemporaneamente e calcolare la varianza totale dell'output (Vtot)
8) Calcolo degli indici di sensibilità del primo ordine ($S_i$) con metodo basato sulla varianza [52]:

$$S_i = \frac{V(x_i)}{\mathrm{Vtot}} \qquad \text{Eq.24}$$

dove l'indice di sensibilità dell'output di ogni variabile di input $x_i$ è il contributo frazionario di tale variabile alla varianza totale dell'output [49].

In questa tesi, il calcolo è implementato considerando tutti le variabili di input non correlate e la somma di tutti gli indici di sensibilità pari a uno. Pertanto, ogni indice di sensibilità può essere rappresentato come percentuale della varianza totale del livello di pressione sonora interna. Più alto è l'indice di sensibilità, maggiore è l'impatto sulla varianza dell'uscita. La varianza totale, o combinata, è percepita come la somma delle varianze stimate correlate all'output, ottenuta da ciascuna perturbazione xi [50], [51].

## 6.2 Applicazione metodo Monte Carlo al caso di studio di Massy

Nel nostro caso la variabile dipendente è il comfort acustico che è una misura indiretta che dipende da diversi parametri, tra i quali il livello di pressione sonora esterna, le caratteristiche acustiche e geometriche dell'edificio. Il livello di incertezza della misura del comfort acustico dipende dalla combinazione delle incertezze di ciascuna variabile di input.
L'analisi di sensibilità, come detto nel paragrafo 6.1, permette di quantificare l'impatto di ciascuna variabile di input sull'incertezza del livello di pressione sonora interna, e quindi sul KPI, individuando così quali sono i parametri più critici e l'affidabilità del livello di pressione sonora interna calcolato. Individuare i parametri più critici è importante per evidenziare quale di essi deve essere considerato attentamente prima di applicare il modello di calcolo del comfort acustico, descritto nel capitolo 4.
Per questa analisi è stata presa in considerazione una sola stanza dell'edificio di Massy, ovvero la camera da letto ad angolo dell'appartamento di tipo T5 al secondo piano, la cui planimetria è riportata in Fig. 55:

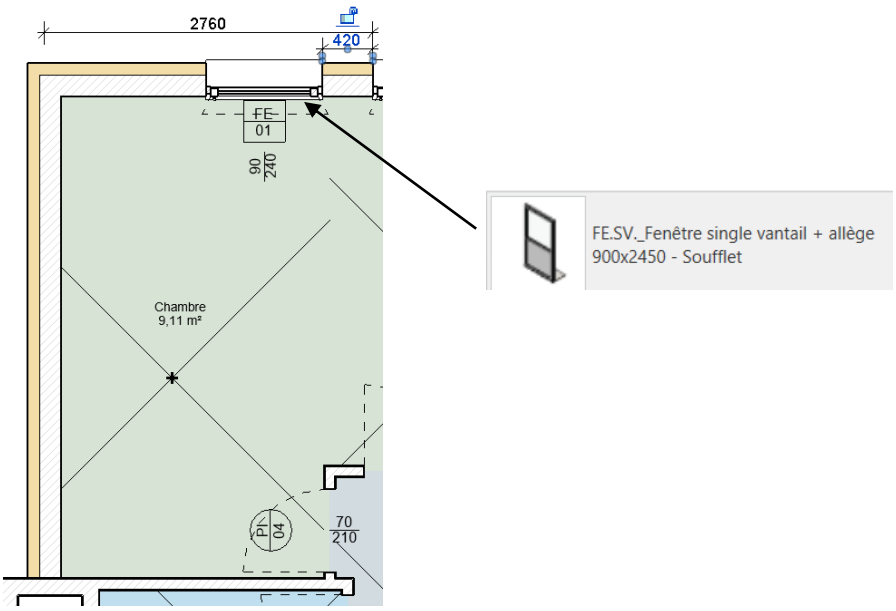



Fig. 55: Planimetria della stanza usata per il calcolo dell'incertezza sul calcolo del livello di pressione sonora interna

Tale stanza presenta soltanto una facciata esposta all'esterno (RF), con superficie di 6.6 $m^2$, in quanto la parete di sinistra confina con un altro appartamento. In tale RF sono presenti due elementi:

- il muro strutturale: spessore di 28 cm, densità pari a 867 $kg/m^3$ e superficie pari a 4.4 $m^2$
- una finestra: della tipologia mostrata in figura e superficie pari a 2.2 m

Il livello di pressione sonora esterna è ricavato dalla mappatura acustica strategica ed è pari a 58 dB.

Dalla simulazione del comfort acustico su questa stanza si ottiene un livello di pressione sonora interna di 25.4 dB(A) e di conseguenza un KPI del 100%, come mostrato in Fig.56:


```
{
    "Buildings": {
        "Building Class": "A",
        "Building ID": 1,
        "Building KPI": 100,
        "Building Message": "High level of building acoustic comfort: retrofit
interventions on building envelope are not required",
        "Critical Room Facades Class": "A",
        "Critical Room Facades ID": 1,
        "District Class": "A",
        "District KPI": 100,
        "District Message": "High level of district acoustic comfort: retrofit
interventions on buildings are not required"
    },
    "Room Facades": {
        "Building Class": "A",
        "Building ID": 1,
        "Building KPI": 100,
        "District Class": "A",
        "District KPI": 100,
        "Door number": 0,
        "Dw": 32.6,
        "External Noise": 58.0,
        "Floor": 3,
        "Internal Noise": 25.4,
        "Room Class": "A",
        "Room Facade Class": "A",
        "Room Facade ID": 1,
        "Room ID": 1,
        "Rw": 33.2,
        "Small element number": 0,
        "T60": 0.5,
        "Wall number": 1,
        "Window number": 1
    }
```


Fig.56: file JSON in uscita dalla simulazione di comfort acustico

Per effettuare l'analisi di sensibilità ci si concentra sui dati che sono stati ipotizzati o stimati, ovvero i dati fonte di maggiore incertezza del livello di pressione interna. Pertanto le variabili di input che sono state considerate sono:

1) l'area della finestra ($S_{win}$)

2) la densità del muro strutturale ($\rho_{wall}$), in quanto non è presente nel BIM ma è stata ricavata in letteratura come spiegato nel paragrafo 4.2.2

3) lo spessore del muro strutturale ($s_{wall}$)

4) il livello di pressione sonora esterna ponderato ($L_{est.}$), in quanto è stato ricavato a partire dalla mappatura acustica strategica e non da misure dirette. Come sappiamo le mappature acustiche strategiche non considerano il rumore reale a 2 metri davanti alla facciata di ciascuna stanza, come farebbero invece le misurazioni dirette, ma solo un valore rappresentativo dell'intera area. Pertanto il livello di pressione sonora esterna ponderato ($L_{est.}$) potrebbe avere una variabilità molto importante.

5) il volume della stanza (V)

Le grandezze 1),3) e 5) sono note dal BIM, tuttavia il BIM contiene dei dati progettuali che potrebbero differire da quelli reali dell'edificio.

Individuate le variabili di input si assegna l'incertezza ad ognuna di esse, esprimendola come incertezza estesa con fattore di copertura k=2 (che garantisce una probabilità del 95%). I valori medi delle variabili di input e le relative incertezze estese date come deviazione standard moltiplicata per il fattore di copertura sono riportati in Tabella 4.

| Variabile di input | Incertezza espansa (k=2) |
|---|---|
| $S_{fin}$ = 2,2 $m^2$ | ±0,5 $m^2$ |
| ρwall = 867 $kg/m^3$ | ±130 $kg/m^3$ |
| $s_{wall}$ = 0,28 m | ±0,1m |
| $L_{est.}$= 58 dB | ±6dB |
| V = 24,1 $m^3$ | ±1$m^3$ |

Tabella 4: Valori medi delle variabili di input e incertezza estesa

Al livello di pressione sonora equivalente ponderata esterna, ricavato dalla mappatura acustica strategica, è stata assegnata una incertezza pari a ±6dB(A), in quanto solitamente la mappatura acustica strategica non fornisce un valore reale per ogni facciata della stanza ma solo un valore rappresentativo di una certa zona.
L'incertezza sulla densità della muratura è stata ricavata sulla base del concetto dell'incertezza assoluta. Si sono ricercati nei data sheets muri acusticamente equivalenti, cioè con stessi valori di spessore e coefficiente di scambio termico, del muro presente nel BIM ($s_{wall}$ = 0,28 m e U=0,40 [$W/m^2K$]). Dai muri acusticamente equivalenti trovati nei data sheets si osserva quella che è la dispersione dei valori di densità attorno a ρwall = 867 $kg/m^3$, assunto come riferimento. Si trova così l'incertezza assoluta come scarto quadratico medio della dispersione dei valori di densità rispetto a ρwall = 867 $kg/m^3$ , e risulta appunto pari a ±130 $kg/m^3$
L'incertezza delle variabili di input 1), 3) e 5) è stata ipotizzata sulla base di specifiche tecniche relative ai dati geometrici fornite tipicamente da BIM di edifici civili.
A questo punto mediante una funzione "random_distrib" in Python si genera un campione di $10^4$ valori casuali per ogni variabile di input, secondo i valori medi e le deviazioni standard, calcolate dalle incertezze, riportati nella Tabella 4. In seguito si perturba il modello di calcolo, mediante un "for", chiamato anche ciclo, in Python, fornendo come input i $10^4$ valori casuali di una delle variabili di input, mantenendo le altre variabili inalterate, ricavando così la distribuzione del livello di pressione sonora interna.
La procedura in Python appena descritta è mostrata in Fig.57 (nel caso in cui la variabile di input considerata è il rumore esterno (Lest)).

```
import requests
import numpy as np
import pandas as pd



mu,sigma=58,3 #mean and standard deviation


def graph(data):
    url = 'http://127.0.0.1:5000/building'
    random_distrib = np.random.normal(mu,sigma,100000)
    esterno = []
    interno = []
    for i in range(0, len(random_distrib)):


        data["RoomFacade"]["External equivalent sound pressure level"] = [random_distrib[i]]
        response = requests.post(url, json = data)
        interno.append(response.json()["Room Facades"]["Internal Noise"])
        esterno.append(random_distrib[i])
    df1 = pd.DataFrame([esterno, interno],
```

Fig.57: Analisi di sensibilità sul livello di pressione sonora esterna

Osservazione: rispetto agli algoritmi originali è stato rimosso, mediante lo stratagemma mostrato in Fig. 58, il limite inferiore nel calcolo del livello di pressione sonora interna.

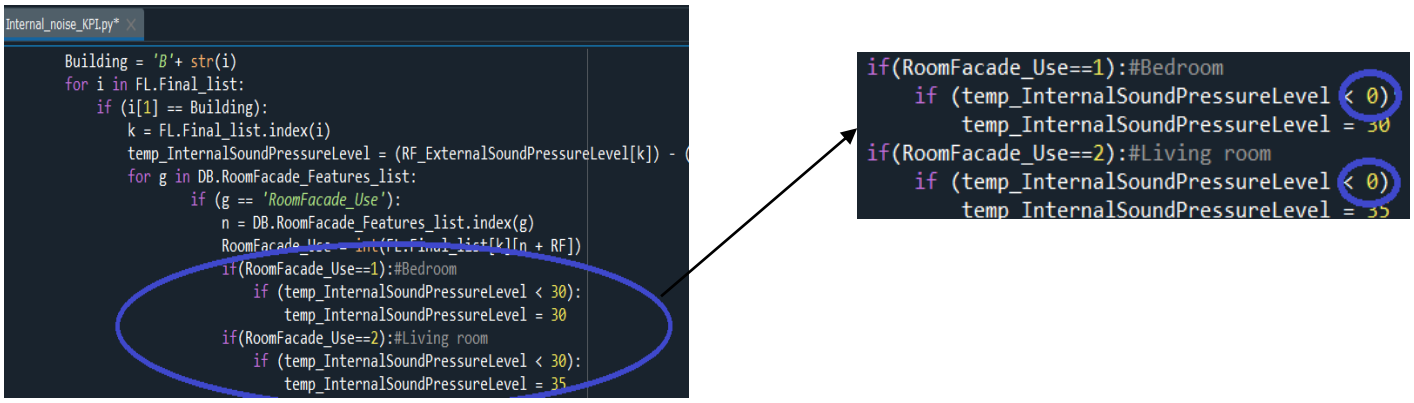



Fig.58: Rimozione limite inferiore nel calcolo del livello di pressione sonora interna

Si ripete la procedura anche per le altre variabili di input, andando a ricavare per ogni distribuzione del livello di pressione sonora interna risultante il valor medio, la varianza, la deviazione standard e l'incertezza estesa, come riportato in tabella 5.
Osservazioni:
- La deviazione standard può essere calcolata direttamente a partire dalla distribuzione del livello di pressione sonora interna risultante in dB.
- Invece per calcolare le altre tre grandezze mostrate nella tabella 5 (varianza, deviazione standard e incertezza), essendo la distribuzione del livello di pressione sonora interna risultante in dB (che è una scala logaritmica e non lineare), è necessario effettuare la conversione della distribuzione nel campo lineare per poi, una volta calcolate le grandezze sopra citate, riconvertire quest'ultime di nuovo in dB.

| **Valor medio livello di pressione sonora interna (dB)** | **Varianza livello di pressione sonora interna (dB)** | **Deviazione standard livello di pressione sonora interna (dB)** | **Incertezza espansa con k=2 (dB)** |
|---|---|---|---|
| 25,39dB | 0,95 dB | 0,47 dB | ±3,49dB |
| 13,37dB | 2,42 dB | 1,21 dB | ±4,22dB |
| 14,77dB | 6,13dB | 3,07 dB | ±6,07dB |
| 26,51dB | 5,84dB | 2,92dB | ±5,91dB |
| 25,44dB | 0,18dB | 0,09 dB | ±3,10dB |

Tabella 5: Incertezza estesa associata al livello di pressione sonora interna relativamente alla perturbazione delle cinque variabili indipendenti

L'analisi di sensibilità relativa ai parametri della muratura è stata effettuata in assenza di finestre, così da avere una valutazione più precisa dell'influenza di questi due parametri sull'incertezza del livello di pressione sonora interna.
Come detto nel paragrafo 6.1, in questa tesi l'analisi di sensibilità è effettuata considerando tutti le variabili di input non correlate e la somma di tutti gli indici di sensibilità pari a 1. Pertanto la varianza totale, o combinata, è percepita come la somma delle varianze ottenute da ciascuna perturbazione xi [50], [51].

La varianza totale (Vtot) è quindi pari a 10,78 dB ed è così possibile calcolare, mediante l'Eq.24, gli indici di sensibilità delle varie variabili di input.

| Variabile di input (xi) | Indice di sensibilità (Si) % |
|---|---|
| $S_{fin}$ | 10,5% |
| ρwall | 14,5 % |
| $s_{wall}$ | 34,3% |
| $L_{est.}$ | 32,0% |
| V | 8,7 % |

Tabella 6: Indici di sensibilità delle variabili in input $x_i$

L'output dell'analisi di sensibilità può essere visualizzato in un grafico a torta così da facilitarne l'interpretazione:

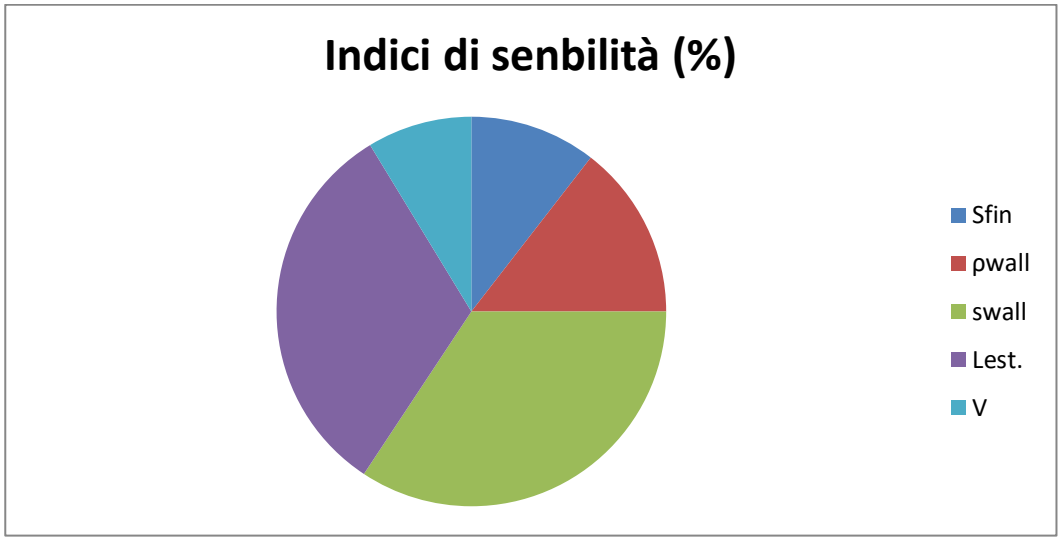



Fig.59: Indici di sensibilità delle variabili in input ($x_i$)

Tale figura mostra quindi quanto ogni variabile considerata impatta sull'incertezza del livello di pressione sonora interna. L'indice di sensibilità del livello di pressione sonora esterna (Lest.) è pari al 32%, mentre quello dello spessore del muro ($s_{wall}$) è pari al 34,3%. Ciò vuol dire che queste 2 sono le variabili critiche, e che, quindi, l'incertezza di queste 2 variabili è la causa principale dell'incertezza del livello di pressione sonora interna. Di conseguenza l'accuratezza nel calcolo del livello di pressione interna, e quindi del KPI, dipende criticamente dall'accuratezza della valutazione di queste 2 variabili. Quindi le incertezze relative alle variabili di input critiche potrebbero comportare rischi di decisioni errate.
Ne deduciamo che per incrementare l'affidabilità nel risultato (il comfort acustico) devo minimizzare l'incertezza delle 2 variabili critiche.
Di conseguenza lo spessore dei muri andrebbe misurato sul campo e non ricavato a partire dal modello BIM, il quale potrebbe non essere aggiornato.
Inoltre, la valutazione del livello di pressione sonora esterna mediante la mappatura acustica

strategica (modalità “Advanced”) rappresenta un metodo veloce ed economico di operare, tuttavia allo stesso tempo può fornire una valutazione del comfort acustico di un edificio non così affidabile. Il modo ottimale di procedere sarebbe di misurare il livello di pressione sonora esterna per ogni Room Facade (RF).
In conclusione, sicuramente la nuova procedura di calcolo del comfort acustico a partire dal BIM dell’edificio, rispetto a quella generale descritta nel capitolo 3, risulta essere più pratica e snella. Tuttavia per massimizzare l’affidabilità della procedura di valutazione del comfort acustico di un edificio a partire dal suo modello BIM, è necessario che il modello BIM contenga dati più precisi ed aggiornati possibili, tra i quali anche i valori dei livelli di pressione sonora esterna misurati su ogni RF. Inoltre il BIM deve contenere tutti i dati riguardanti l’edificio, mentre, come visto nel paragrafo 4.2.2, spesso manca la densità dei muri.

## 6.3: Analisi di incertezza del caso di studio di Massy

La varianza totale (Vtot) è, come detto nel paragrafo 6.2, pari a 10,78 dB ed, effettuando il passaggio in lineare, mediante la radice è possibile calcolare la deviazione standard. Moltiplicando per 2 trovo l’incertezza estesa complessiva in campo lineare. Effettuando di nuovo il passaggio in dB, trovo il valore di incertezza estesa complessiva in dB sul livello di pressione sonora interna, che risulta pari a 25,40 ± 8,40 dB. Ciò significa che, osservando la Fig. 60, la classe acustica della camera da letto considerata può variare tra la classe A e la classe C (nel 95% dei casi).

| Type of space | Class A | Class B | Class C | Class D | Class E |
|---|---|---|---|---|---|
| Bedroom | $L_{Aeq} \leq 30$ | $30 < L_{Aeq} \leq 32.5$ | $32.5 < L_{Aeq} \leq 35$ | $35 < L_{Aeq} \leq 40$ | $L_{Aeq} > 40$ |

Fig.60: classe acustica delle camere da letto sulla base del livello di pressione sonora equivalente ponderata interna

A questo punto è stata svolta un’analisi di incertezza del KPI, in modo da osservare come l’incertezza del KPI impatta sull’assegnazione della classe acustica dell’edificio e, quindi, sulla decisione di effettuare un intervento di ristrutturazione o meno. Viene propagata l’incertezza sul livello di pressione sonora interna, appena calcolata, nel modello di calcolo del KPI (Eq.22).
L'analisi dell'incertezza viene eseguita applicando nuovamente la simulazione Monte Carlo, perturbando il modello di calcolo del KPI con una distribuzione della variabile di input del modello, che ora è il livello di pressione sonora interna, con valor medio di 25,40 dB e deviazione standard pari a 5,4 dB (calcolata a partire dall’incertezza pari a ± 8,40 dB).
Il risultato della simulazione è che il KPI dell’edificio, costituito dalla singola camera da letto, pari al 100% presenta un’incertezza del ± 41,5%. Ciò vuol dire che anche la classe acustica dell’edificio può variare tra la classe A e la classe C (nel 95% dei casi), come si osserva dalla Fig.61:

| Class A | Class B | Class C | Class D | Class E |
|---|---|---|---|---|
| 87.5%<KPI≤100% | 62.5%<KPI≤87.5% | 37.5%<KPI≤62.5% | 12.5%<KPI≤37.5% | 0%≤KPI≤12.5% |

Fig.61: classe acustica dell'edificio sulla base del valore del KPI

Di conseguenza, il messaggio fornito in uscita dalla simulazione di comfort acustico può variare tra "Alto livello di comfort acustico" e "Accettabile livello di comfort acustico", come mostrato in Fig. 62:

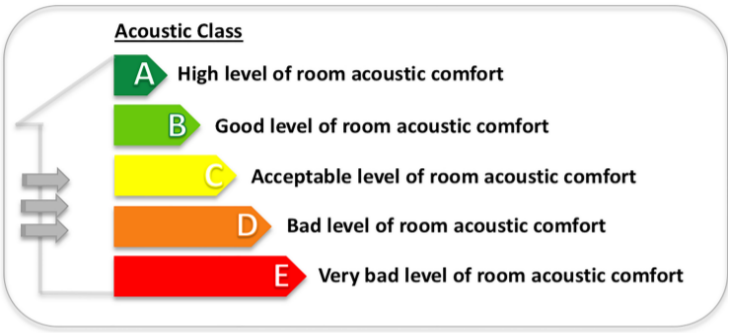



Fig.62: Messaggio associato alla classe acustica dell'edificio

Per ridurre il problema, è necessario ridurre al minimo l'incertezza delle variabili di input che sono state riconosciute come critiche attraverso la simulazione Monte Carlo (vedi Fig.59). Infatti, migliorando l'accuratezza nella valutazione del livello di pressione sonora interna, che dipende dall'incertezza delle variabili di input analizzate, si riduce l'incertezza sul KPI. Di conseguenza, come detto nel paragrafo 6.2, lo spessore dei muri andrebbe misurato sul campo, e non ricavato a partire dal modello BIM, e il livello di pressione sonora esterna andrebbe misurato per ogni Room Facade (RF). Inoltre il BIM deve contenere tutti i dati riguardanti l'edificio, mentre, come visto nel paragrafo 4.2.2, spesso manca la densità dei muri.
Un'altra soluzione, per avere un ulteriore affidabilità del risultato, potrebbe essere quella di valutare il KPI sulla base della valutazione degli occupanti (KPI soggettivo).

# CAPITOLO 7: CONCLUSIONI

Data l'importanza di considerare gli aspetti legati al comfort acustico già in sede di progettazione, come spiegato nel capitolo 1, e data l'importanza del BIM nell'intero ciclo di vita di un edificio, come descritto nel paragrafo 4.1, si è reso necessario lo sviluppo di una nuova procedura di calcolo del comfort acustico a partire dai dati contenuti nel BIM.

Questo deriva dal fatto che la procedura generale di calcolo del comfort acustico, descritta nel capitolo 3, non risulta essere pratica nel caso specifico in cui i dati vengano reperiti direttamente dal modello BIM dell'edificio. Infatti nei modelli BIM degli edifici, soprattutto riferiti ad edifici vecchi da riqualificare, mancano diverse informazioni tra le quali, principalmente, il potere fonoisolante dei vari elementi di facciata. E' stato quindi necessario sviluppare una procedura ad "hoc" per questa applicazione specifica. Sono state eseguite alcune modifiche nei dati di input richiesti dal modulo di calcolo originale, con l'obiettivo, appunto, di facilitare l'integrazione di questo con i BIM degli edifici. E' stato aggiunto un oggetto, identificato dalla chiave "Wall" (Fig.29), con l'obiettivo di facilitare l'inserimento delle informazioni relative alle diverse composizioni delle pareti degli edifici, necessarie per il calcolo del potere fonisolante delle stesse a partire dalla massa superficiale, richiesta dal modulo acustico al posto del Rw (assente nel BIM). Inoltre, spesso, nel BIM, oltre al potere fonoisolante, non sono contenute neanche informazioni circa la densità dei vari strati di un muro ma solo le loro proprietà termiche. Quindi per ovviare a tale inconveniente si è risaliti, ricercando in letteratura, ad un muro che presenti stesse proprietà termiche e spessore (e quindi proprietà acustiche equivalenti), così da ricavarne la massa superficiale. Inoltre, sempre allo scopo di perseguire l'idea del BIM, cioè di rendere più snello e ottimale il progetto lungo l'intero ciclo di vita di un edificio (a partire ovviamente dalla fase progettuale),è stato sviluppato un involucro software al modulo di calcolo. Così facendo il formato tramite cui inviare i dati è il JSON, facilmente comprensibile; a differenza dei file CSV che, per quanto efficienti da un punto di vista computazionale, risultano di difficile gestione e interpretazione umana.

E' stato poi realizzato un caso di studio di un intero edificio da riqualificare situato in Massy, di cui era disponibile il modello BIM, per dimostrare l'applicabilità di questa nuova metodologia, descritta nel capitolo 4, ed evidenziare le difficoltà.

Infine per verificare l'affidabilità della nuova procedura, descritta nel capitolo 4, è stata effettuata un'analisi di sensibilità e incertezza.

Si è trovato che l'indice di sensibilità del livello di pressione sonora esterna (Lest.) è pari al 32%, mentre quello dello spessore del muro ($s_{wall}$ ) è pari al 34,3%. Ciò vuol dire che queste 2 sono le variabili critiche, e che, quindi, l'incertezza di queste 2 variabili è la causa principale dell'incertezza del livello di pressione sonora interna. Di conseguenza l'accuratezza nel calcolo del livello di pressione interna, e quindi del KPI, dipende criticamente dall'accuratezza della valutazione di queste 2 variabili.

Ne deduciamo che per incrementare l'affidabilità nel risultato (il comfort acustico) devo minimizzare l'incertezza delle 2 variabili critiche.

Di conseguenza lo spessore dei muri andrebbe misurato sul campo e non ricavato a partire dal

modello BIM.
Inoltre, la valutazione del livello di pressione sonora esterna mediante la mappatura acustica strategica rappresenta un metodo veloce ed economico di operare, tuttavia allo stesso tempo può fornire una valutazione del comfort acustico di un edificio non così affidabile. Il modo ottimale di procedere sarebbe di misurare il livello di pressione sonora esterna per ogni Room Facade (RF).
E' stata poi ricavata l'incertezza estesa complessiva sul livello di pressione sonora interna, che risulta pari a 25,40 ± 8,40 dB. A questo punto è stata svolta un'analisi di incertezza del KPI, in modo da osservare come l'incertezza del KPI impatta sull'assegnazione della classe acustica dell'edificio e, quindi, sulla decisione di effettuare un intervento di ristrutturazione o meno. Il risultato è stato che il KPI dell'edificio, costituito dalla singola camera da letto, pari al 100% presenta un'incertezza del ± 41,5%. Ciò vuol dire che anche la classe acustica dell'edificio può variare tra la classe A e la classe C (nel 95% dei casi), come si osserva dalla Fig.61. Di conseguenza, il messaggio fornito in uscita dalla simulazione di comfort acustico può variare tra "Alto livello di comfort acustico" e "Accettabile livello di comfort acustico", come mostrato in Fig. 62.
Per ridurre il problema, è necessario ridurre al minimo l'incertezza delle variabili di input che sono state riconosciute come critiche attraverso la simulazione Monte Carlo (vedi Fig.59). Infatti, migliorando l'accuratezza nella valutazione del livello di pressione sonora interna, che dipende dall'incertezza delle variabili di input analizzate, si riduce l'incertezza sul KPI. Di conseguenza, come detto nel paragrafo 6.2, lo spessore dei muri andrebbe misurato sul campo, e non ricavato a partire dal modello BIM, e il livello di pressione sonora esterna andrebbe misurato per ogni Room Facade (RF). Inoltre il BIM deve contenere tutti i dati riguardanti l'edificio, mentre, come visto nel paragrafo 4.2.2, spesso manca la densità dei muri.
In conclusione, sicuramente la nuova procedura di calcolo del comfort acustico a partire dal BIM dell'edificio, rispetto a quella generale descritta nel capitolo 3, risulta essere più pratica e snella. Tuttavia per massimizzare l'affidabilità e minimizzare l'incertezza della procedura di valutazione del comfort acustico di un edificio a partire dal suo modello BIM, è necessario che il modello BIM contenga dati più precisi ed aggiornati possibili, tra i quali anche i valori dei livelli di pressione sonora esterna misurati su ogni RF. Inoltre il BIM deve contenere tutti i dati riguardanti l'edificio, in particolare la densità dei muri.

## RIFERIMENTI


[1] Sakhare, V. V., and R. V. Ralegaonkar. "Indoor environmental quality: Review of parameters and assessment models." *Architectural Science Review* 57.2 (2014): 147-154.
[2] Roulet, C. A. (2001). Indoor environment quality in buildings and its impact on outdoor environment. Energy and buildings, 33(3), 183-191.
[3] F. Cotana and M. Goretti, Acoustic Classification of Buildings: Impact of AcousticPerformances of a High Energy-Efficient Building on Quality and Sustainability Indicators, 20th International Congress on Acoustics, ICA (2010): 1-6.
[4] M. Economidou, Energy performance requirements for buildings in Europe, REHVA Journal (2012): 16-21.
[5] M. Vytautas, E. Kazakevičius, and A. Vitkauskas. "A two-factor method for appraising building renovation and energy efficiency improvement projects." Energy policy 35.1 (2007): 192-201.
[6] Schweizer, Christian, et al. "Indoor time–microenvironment–activity patterns in seven regions of Europe." *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology* 17.2 (2007): 170.
[7] Loftness, Vivian, et al. "Elements that contribute to healthy building design." Environmental health perspectives 115.6 (2007): 965.
[8] Mihai, Toderaşc, and Vlad Iordache. "Determining the indoor environment qualityfor an educational building." *Energy Procedia* 85 (2016): 566-574
[9] Altomonte, S., Rutherford, P., Wilson, R., 2015. Human factors in the design of sustainable built environments. Intelligent Building International 7 (4), 224–241. Special Issue: Workspaces Promoting Wellbeing.
[10] Kim, Jungsoo & de Dear, Richard. (2013). Workspace satisfaction: The privacy- communication trade-off in open-plan offices. Journal of Environmental Psychology. 36. 18–26. 10.1016/j.jenvp.2013.06.007.
[11] World Health Organization (WHO). World Health Report: Prevention of Noise- Induced Hearing Loss. Geneva: World Health Organization (1997): 55.
[12] Vardaxis, Nikolaos-Georgios, Delphine Bard, and Kerstin Persson Waye. "Reviewof acoustic comfort evaluation in dwellings—part I: Associations of acoustic field data to subjective responses from building surveys." *Building Acoustics*25.2 (2018):151-170.
[13] Frontczak, Monika, and Pawel Wargocki. "Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments." Building and environment 46.4 (2011): 922-937.
[14] Vardaxis, Nikolaos-Georgios, and Delphine Bard. "Review of acoustic comfort evaluation in dwellings: part II—impact sound data associated with subjective responses in laboratory tests." *Building Acoustics* (2018): 1351010X18772026.
[15] Kim, Jungsoo & de Dear, Richard. (2013). Workspace satisfaction: The privacy- communication trade-off in open-plan offices. Journal of Environmental Psychology. 36. 18–26. 10.1016/j.jenvp.2013.06.007.
[16] A. Dösemecilier, Evaluation of the sound insulation of building facades: a sample of Taksim – Besiktas; Instambul, 1st International CIB Endorsed METU Postgraduate Conference Built Environment & Information Technologies, Ankara,2006.
[17] B. Rasmussen, Facade sound insulation comfort criteria in European classification schemes for dwellings, Euronoise 2006 (2006).
[18] B. Rasmussen, International proposal for an acoustic classification scheme for dwellings: background and perspectives, Inter-Noise 2014: 43rd International Congress on Noise Control Engineering (2014).
[19] UNI 11367:2010 Acustica in edilizia - Classificazione acustica delle unitàimmobiliari - Procedura di valutazione e verifica in opera (2010).
[20] Italian National Decree DPCM 05.12.1997, Determinazione dei requisiti acusticipassivi degli edifici in G.U. 22.12.1997 n. 297 (1997).
[21] Rocco, L., Baistrocchi, C., Cellai, G., Sauro, S., & Secchi, S. L'EVOLUZIONE DELLA PROTEZIONE ACUSTICA DEGLI EDIFICI IN ITALIA: NORME,METODI E SOLUZIONI.
[22] Kuerer, Ralf C. "Classes of acoustical comfort in housing: improved information about noise control in buildings." Applied Acoustics 52.3-4 (1997): 197-210.].
[23] Dejaco, Mario Claudio, Fulvio Re Cecconi, and Sebastiano Maltese. "Key Performance Indicators for Building Condition Assessment." Journal of Building Engineering 9 (2017): 17-28.
[24] EN ISO 12354 part 3, Building acoustics — Estimation of acoustic performance ofbuildings from the performance of elements —Airborne sound insulation against outdoor sound, 2017.
[25] Spagnolo, Renato, ed. *Manuale di acustica applicata*. UTET libreria, 2001.
[26] Salter, Charles M., and Travis R. Lawrence. "Acoustical performance measurementprotocols for commercial buildings." (2012).
[27] Puglisi, G. E., et al. "Acoustic comfort in high-school classrooms for students and teachers." *Energy Procedia* 78

(2015): 3096-3101.
[28] ISO, BSEN. "10140-1: Acoustics." Laboratory Measurement of Sound Insulation of Building Elements. Application Rules for Specific Products (2014).
[29] G.K. Oral, A. K. Yener, and N.T. Bayazit. "Building envelope design with the objective to ensure thermal, visual and acoustic comfort conditions." Building and Environment 39.3 (2004): 281-287.
[30] Heinzerling, D., et al., Indoor environmental quality assessment models: A literaturereview and a proposed weighting and classification scheme. Building and Environment, 2013. 70: p. 210-222.
[31] N. Granzotto, F. Bettarello, A. Ferluga, L. Marsich, C. Schmid, P. Fausti and M. Caniato, Energy and acoustic performances of windows and their correlation, Energy and Buildings, 136 (2017): 189-198.
[32] Pr. EN 12354-3, Building acoustics; estimation of acoustic performance of buildings from the performance of products, part 3: airborne sound insulation against outdoor sound;
[33] UNI, EN. "29052-1: 1993 Acustica." Determinazione della rigidità dinamica. Materiali utilizzati sotto i pavimenti galleggianti negli edifici residenziali
[34] L. Busa, S. Secchi and S. Baldini, Effect of façade shape for the acoustic protectionof buildings." Building Acoustics 17(4) (2010): 317-338.
[35] EN ISO 11654:1998 Acoustics – Sound absorbers for use in buildings – Rating of sound absorption.
[36] EN ISO 12354 – 6, Building Acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Sound absorption in enclosed spaces,2006.
[37] EN ISO 3382 - 2, Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 2: Reverberation time in ordinary rooms, 2008.
[38] Directive 2002/49/EC. Directive of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise. Official J Eur Communities 2002; L189: 12-25.
[39] European Environment Technical Report No 4/2014. Good practice guide on quietareas. ISSN 1725-2237.
[40] ISO 9613 – 2 – Acoustics – Attenuations of sound during propagation outdoors – Part 2: Genaral method of calculation, 1996.
[41] D. Casini, G. Cellai and S. Secchi, L'impatto acustico da eventi rumorosi dovuti allapulizia stradale nei centri abitati, Associazione Italiana di Acustica, 43° Convegno Nazionale, Alghero (2016).
[42] B. Berglund, T. Lindvall, D.H. Schwela, Guidelines for communitynoise, Guidelines for community noise (1999).
[43] Soft Sensors: Metodologie di progettazione e ottimizzazione Rapporto Tecnico N.: 6 RT-ICAR-PA-15-06 Dicembre 2015
[44] Kaneko, Hiromasa, and Kimito Funatsu. "Estimation of Predictive Accuracy of SoftSensor Models Based on One-Class Support Vector Machine." *Computer Aided Chemical Engineering*. Vol. 31. Elsevier, 2012. 1246-1250.
[45] Alwaer, Husam, and D. J. Clements-Croome. "Key performance indicators (KPIs) and priority setting in using the multi-attribute approach for assessing sustainable intelligent buildings." Building and environment 45.4 (2010): 799-807.
[46] ISO/TS 15666:2003 Acoustics — Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys, 2003
[47] Fredrik Ljunggren, Christian Simmons, Klas Hagberg, Correlation between sound insulation and occupants' perception – Proposal of alternative single number ratingof impact sound, Applied Acoustics, Volume 85, November 2014, Pages 57-68, ISSN 0003-682X.
[48] (BIM 3.0 dal disegno alla simulazione: nuovo paradigma per il progetto e la produzione edilizia , "Carlos Argiola, Riccardo Prenza, Emanuela Quaquero).
[49] G.M. Revel, E. Sabbatini, and M. Arnesano, Development and experimental evaluation of a thermography measurement system for real-time monitoring of comfort and heat rate exchange in the built environment, Measurement Science andTechnology 23(3) (2012): 035005.
[50] JCGM. "Evaluation of measurement data—Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement"—Propagation of distributions using a Monte Carlo method". Joint Committee for Guides in Metrology (2008).
[51] B. Putnam, D. Handzy (2002), "Gambling on Monte Carlo", *Global Investor,*154:49-52
[52] A. Saltelli, Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Model,John Wiley and Sons, Chichester, UK (2004).
[53] Mahdavi, Ardeshir. "From Building Physics to Urban Physics." Stadt: Gestalten.Springer, Vienna, 2012. 181-186.
[54] S. Secchi, A. Astolfi, G. Calosso, D. Casini, G. Cellai, F. Scamoni, Effect of outdoornoise and façade sound insulation on indoor acoustic environment of Italian schools, Applied Acoustics, 126 (2017): 120-130.
[55] TAGLIAFERRO, ANTONELLA **"**Analisi del comfort globale in aule universitarie: aspetti normativi, indagine statistico-sperimentale, casi di studio"

[56] L. Squartini “Valutazione dell’incertezza nella stima del Weighted Sound Reduction Index (Rw) in acustica edilizia”
[57] Oberti Ilaria 2014 “Comfort acustico”
[58] Comfort Acustico Per Edifici Predisposti Alla Didattica: Integrazione Della Progettazione Architettonica E Acustica Andrea Tombolato (1), Federica Bettarello (2), Marco Caniato (2), Stefano Cordeddu (1) 1) Studio Di Acustica, Padova 2) Acusticamente - Studio Associato Di Ingegneria, Conegliano (Tv)
[59] Gianni Cesini “Lezioni di Acustica applicata e Illuminotecnica” 2017
[60] R.Albatici, A.Di Bella, P.Fausti,A.Frattari ” Isolamento acustico di pareti interne in laterizio: misure e metodi”
[61] R.Popmpoli, S.Secchi “Isolamento acustico delle facciate: Confronto normativo”
[62] “Il futuro del disegno con il BIM per ingegneri e architetti” A.Osello, D.Flaccovio 2012
[63] “BIM 3.0 : Dal disegno alla simulazione: Nuovo paradigma per il progetto e la produzione edilizia” C.Argiolas, E.Quaquero, R.Prenza
[64] **“**The centrality of Representation with B.I.M” *Anna Osello, Sanaz Davardoust, Francesco Semeraro, Greta Lucibello*