



Università degli Studi di Cagliari

DOTTORATO DI RICERCA
IN INGEGNERIA STRUTTURALE
Ciclo XXV

TITOLO TESI

**MODELLO DI CALCOLO MULTI FISICO PER LA PROGETTAZIONE DEI REQUISITI
ACUSTICI, ENERGETICI ED ILLUMINAZIONE NATURALE DEGLI EDIFICI.**

Settore/i scientifico disciplinari di afferenza

ING-IND/11

Presentata da: Costantino Carlo Mastino

Coordinatore Dottorato: Prof.ssa Barbara De Nicolo

Tutor/Relatore: Prof.ssa Barbara De Nicolo / Prof. Carlo Bernardini

Esame finale anno accademico 2011 – 2012

MODELLO DI CALCOLO MULTI FISICO

PER LA PROGETTAZIONE DEI REQUISITI ACUSTICI, ENERGETICI ED

ILLUMINAZIONE NATURALE DEGLI EDIFICI

Sommario

1	Introduzione	3
2	Stato dell'arte, Richiami di fisica tecnica e principali norme utilizzate.....	7
2.1	Acustica	7
2.1.1	Requisiti acustici passivi degli edifici	7
2.1.2	Potere fono isolante di divisori e pareti	11
2.1.3	misure in laboratorio e in opera del potere fonoisolante	17
2.2	Aspetto normativo e scientifico	19
2.2.1	Acustica edilizia	19
2.2.2	Efficienza Energetica degli edifici.....	45
2.2.3	Illuminazione naturale degli edifici.....	58
2.2.4	Principali Pubblicazioni scientifiche analizzate	65
3	Modello di calcolo sviluppato	76
3.1	Principali Componenti	77
3.1.1	Gear Structure.....	77
3.1.2	Gear To Archline Xp	84
3.1.3	Gear Graphics Structure.....	87
3.2	Cosa fa il modello	87
3.2.1	Gestore proprietà fisiche	89
3.2.2	Calcolo energetico	89
3.2.3	Calcolo Acustico	92

3.2.4	Calcolo del fattore di luce diurna.....	94
3.3	Dati necessari per i calcoli.....	95
3.4	Risultati ottenibili dal modello.....	96
3.5	Caratteri innovativi del modello.....	99
4	Conclusioni.....	100
5	Bibliografia, pubblicazioni, norme unificate di riferimento e webgrafia.....	101
5.1	Bibliografia.....	101
5.2	Principali pubblicazioni scientifiche di riferimento.....	102
5.3	Norme unificate di riferimento.....	103
5.4	Webgrafia.....	103

1 Introduzione

La presente ricerca ha lo scopo di analizzare gli aspetti legati alla progettazione acustica ed energetica negli edifici. Attualmente in Italia si riscontra, presso i tecnici, una forte sensibilizzazione per le tematiche energetiche, mentre quelle inerenti il confort acustico sono spesso affrontate secondariamente.

Negli ultimi anni è emerso in maniera evidente il ruolo che l'energia assume nelle diverse attività ingegneristiche, con particolare riferimento alla progettazione strutturale ed architettonica. Ma ai nuovi edifici viene richiesto di garantire condizioni confortevoli non solo dal punto di vista termo-igrometrico ma anche acustico e visivo. La sfida ingegneristica che oggi deve essere affrontata consiste nel raggiungere sempre maggiori livelli di confort abitativo con una riduzione dei consumi energetici.

L'obiettivo della ricerca sviluppata durante i tre anni di Dottorato è stato finalizzato allo studio delle interazioni che esistono fra i diversi aspetti legati al confort (energetici ed acustici) in relazione alla tipologia strutturale degli edifici e al contesto legislativo e normativo europeo e nazionale. Sono state studiate le diverse correlazioni ed interazioni che accomunano le diverse problematiche e sono stati individuati i parametri che possono essere considerati comuni, sulla base dei quali è possibile correlare e ottimizzare il sistema. Il tutto è stato implementato su base informatica creando un modello di calcolo che consente di valutare ed ottimizzare le diverse problematiche nella fase progettuale dell'edificio.

La ricerca è stata sviluppata in collaborazione con La Cadline Software srl di Padova (PD), azienda operante nel settore delle tecnologie informatiche innovative, distributrice per l'Italia del sistema cad architettonico tridimensionale denominato "Archline Xp". L'azienda è interessata da tempo alle problematiche Energetiche e Ambientali legate alla progettazione edilizia e ha deciso di finanziare la ricerca e lo sviluppo del motore di calcolo interfacciato con il sistema Cad archlineXP.

Durante la ricerca si sono sviluppate le seguenti fasi e curati i seguenti aspetti:

- Ricerca bibliografica indirizzata sui principali testi di fisica tecnica, energetica ed acustica e illuminotecnica presenti a livello nazionale ed internazionale. La ricerca

sullo stato dell'arte è stata eseguita riferendosi principalmente alle pubblicazioni scientifiche a livello nazionale e soprattutto internazionale, pubblicate principalmente negli ultimi sei anni, alle norme UNI EN ISO, e ai principali testi che trattano i diversi aspetti specifici della fisica. Lo studio delle pubblicazioni esaminate ha portato, per quanto riguarda l'aspetto energetico, ad evidenziare alcune pubblicazioni scientifiche che trattano nello specifico i singoli aspetti legati alla progettazione energetica e alla sua ottimizzazione mediante lo studio energetico del sistema edificio-impianto. Per gli aspetti acustici passivi, i modelli di calcolo previsionali, riportati in diverse pubblicazioni scientifiche nazionali e internazionali, fanno nella maggior parte dei casi riferimento alla normativa UNI EN ISO. Queste norme in campo acustico rappresentano lo stato dell'arte.

- Contattati con diverse aziende operanti nel settore sia a livello regionale che nazionale, le quali hanno manifestato la propria disponibilità a fornire i dati sperimentali sui propri materiali e sistemi.
- Analisi e studio dell'ambito legislativo, europeo e nazionale, in cui il prodotto della Cadline software opera e che il modello di calcolo doveva considerare.

Dall'analisi dello stato dell'arte è emerso che l'obiettivo della ricerca si pone come elemento innovativo in quanto attualmente esistono poche informazioni su modelli di calcolo che all'interno di un'unica procedura consentano la progettazione, il dimensionamento e l'ottimizzazione del sistema edilizio per quanto riguarda gli aspetti energetici ed acustici il tutto correlato ad un modello architettonico tridimensionale.

Nel primo anno di ricerca si è iniziata l'implementazione del modello matematico riguardante lo stato dell'arte studiato. Successivamente si sono studiati e ricercati i parametri più "adatti" che potessero mettere in relazione i diversi aspetti del calcolo, legati alla valutazione in fase progettuale, delle prestazioni acustiche ed energetiche degli edifici. Lo studio dell'argomento e l'avanzamento della ricerca ha portato alla realizzazione di un codice di calcolo, implementato sul linguaggio C++ e C#, che consente il calcolo delle singole problematiche (acustiche ed energetiche). Sono stati individuati inoltre alcuni parametri che mettono in relazione le diverse procedure di calcolo e che consentono di conseguenza di correlare i diversi aspetti fisici. In particolare l'attuale modello matematico sviluppato consente dal punto di vista energetico il calcolo del

fabbisogno di energia ideale per la climatizzazione estiva ed invernale del sistema edificio impianto così come previsto dalla norma europea UNI EN ISO 13790-2008 e dal recepimento nazionale basato sulle norme della serie UNI TS 11300; mentre dal punto di vista Acustico sono state studiate e implementate le norme della serie UNI EN12354, il recepimento nazionale UNI TR 11175 per il calcolo delle prestazioni acustiche passive degli elementi che costituiscono l'involucro edilizio.

Grazie al rapporto di collaborazione instaurato con la Cadline software S.r.l., è stato possibile sfruttare come base di input per tutte le informazioni geometriche l'interfaccia grafica offerta dal sistema cad tridimensionale messo a disposizione dalla suddetta azienda. La tecnologia avanzata, offerta dal modo con cui il cad tridimensionale archivia e tratta tutte le informazioni "geometriche spaziali", ha reso possibile implementare degli algoritmi intelligenti che eseguono l'operazione denominata "parzializzazione dinamica delle superfici". Questa operazione consente, partendo da un modello tridimensionale di un qualsiasi edificio progettato in archlineXP, di sfruttare tutte le informazioni geometriche, di esposizione, orientamento, affiancamento di zone termiche o acustiche, per eseguire in maniera dettagliata tutti i calcoli previsionali inerenti la prestazione energetica e la prestazione acustica. Lo sviluppo della ricerca ha portato a un modello di calcolo in grado di gestire la singola problematica ma anche la correlazione fra le diverse "fisiche" riferite agli aspetti energetici e acustici.

Le principali norme UNI , EN, ISO necessarie per i calcoli, implementate nel codice di calcolo sviluppato, sono state riportate in sintesi nello stato dell'arte normativo (capitolo 2). Oltre alle norme sono stati sviluppate e implementate nel codice delle funzioni di correlazione fra le diverse problematiche trattate.

Nell'ultima fase della ricerca sono stati studiati e sviluppati algoritmi di ricerca e ottimizzazione che sulla base dei parametri di riferimento impostati sull'interfaccia, tenendo conto del contesto normativo, consentono di ottimizzare i sistemi costruttivi impiegati nel progetto ai fini del rispetto normativo e del raggiungimento delle prestazioni richieste. Onde testare il funzionamento dei diversi algoritmi, essendo molto oneroso dal punto di vista temporale sviluppare un'unica interfaccia grafica e non essendo questo lo scopo della presente ricerca, sono state create delle singole

schermate prototipo in ambiente *Visual Studio* Microsoft con l'utilizzo dei linguaggi C++ e C#. Le immagini delle schermate sono riportate nel capitolo 3.

L'intero modello di calcolo sviluppato è stato creato all'interno di una DLL (libreria ad accesso dinamico) che in accordo con la Cadline Software si è denominato GEAR (*Graphics Expert Analytical Relational*).

2 Stato dell'arte, Richiami di fisica tecnica e principali norme utilizzate

Nel presente capitolo si riportano le principali norme UNI, EN e ISO, utilizzate nello svolgimento della presente ricerca, in materia di efficienza energetica degli edifici, calcolo previsionale dei requisiti acustici passivi, comfort degli ambienti e illuminazione naturale. Si riporta inoltre la sintesi delle principali pubblicazioni scientifiche a cui si è fatto riferimento per l'ideazione del modello di calcolo riportato nel presente lavoro di ricerca.

2.1 Acustica

Nel presente paragrafo è riportata una breve introduzione alla problematica acustica del settore edile che come detto in premessa è stata per anni trascurata nonostante tali requisiti siano di fondamentale importanza per garantire abitazioni e locali confortevoli.

2.1.1 Requisiti acustici passivi degli edifici

Per contenere l'inquinamento da rumore all'interno degli ambienti abitativi, sono fissati i requisiti acustici passivi delle strutture che compongono gli edifici e dei loro componenti in opera. Le grandezze utilizzate per caratterizzare acusticamente le strutture edilizie sono definite come segue:

- R' potere fono isolante apparente di partizioni tra ambienti. È la grandezza che definisce le proprietà isolanti di una parete divisoria tra due ambienti;
- L'_n livello di rumore di calpestio di solai normalizzato. Definisce il livello di rumore trasmesso per via strutturale e che interessa il complesso pavimento-solaio;
- $D_{2m,nT}$ isolamento acustico standardizzato di facciata. Determina le proprietà isolanti di una facciata che separa l'ambiente esterno da quello interno.
- $L_{As,max}$ Livello massimo di pressione sonora ponderato A con costante di tempo slow di impianti a funzionamento discontinuo
- L_{Aeq} Livello equivalente di pressione sonora ponderato A di impianti a funzionamento continuo

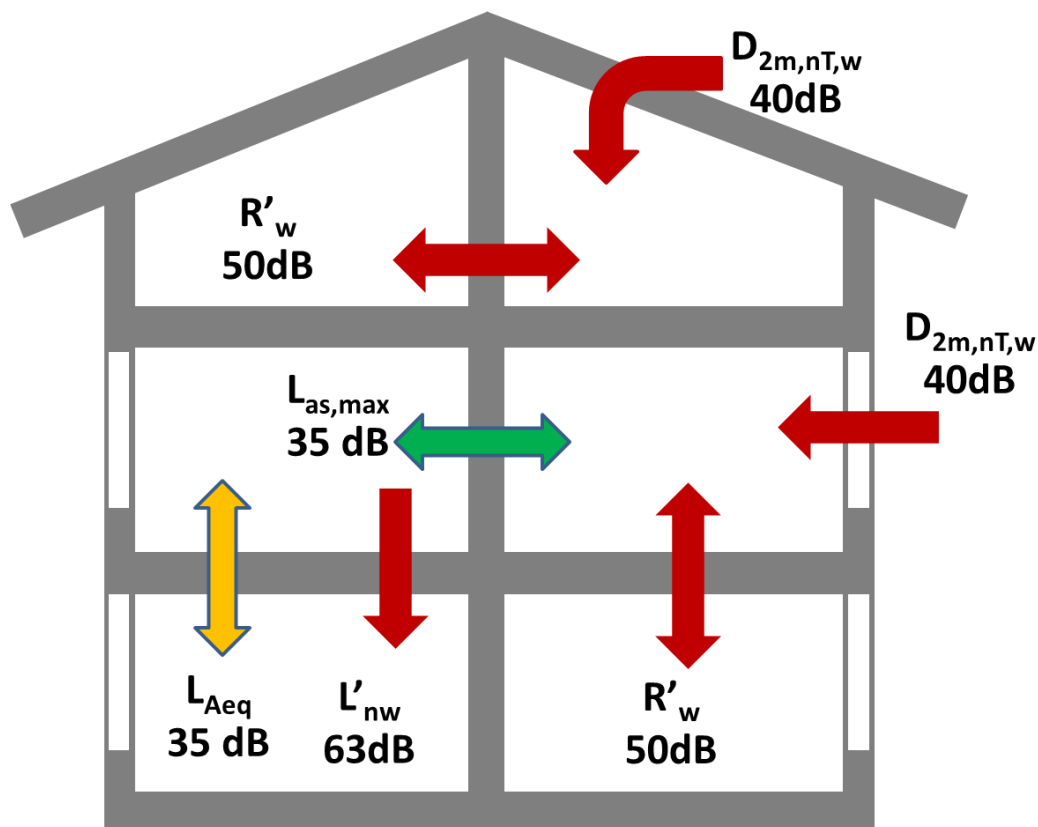


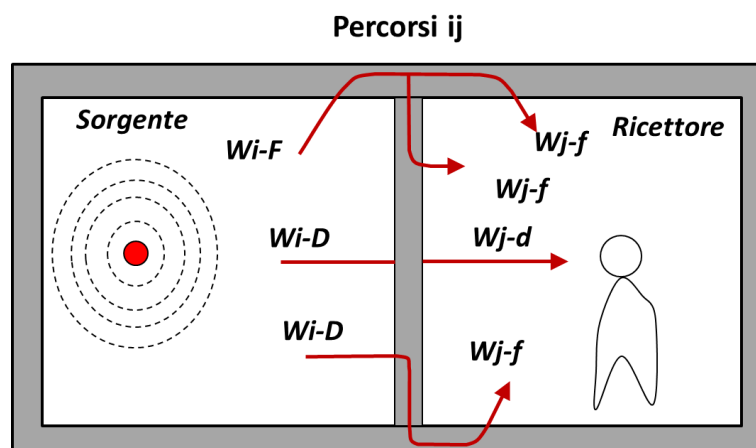
Figura 2-1 (Indici Limite di legge requisiti acustici passivi)

I documenti tecnici di riferimento per la valutazione di progetto di queste grandezze sono le norme della serie UNI EN 12354. In particolare, la parte prima di tale serie di norme riguarda la previsione dell'isolamento dal rumore per via aerea tra ambienti, la seconda l'isolamento dal rumore di calpestio fra ambienti, la terza riguarda l'isolamento acustico di facciata e la quarta la trasmissione del rumore dall'ambiente interno a quello esterno. Le norme prevedono due procedure per il calcolo delle prime due grandezze: una dettagliata, in bande di frequenza, e una semplificata, che si limita agli indici di valutazione delle suddette grandezze. Gli indici di valutazione sono indicatori sintetici, utili per fare confronti e valutare in maniera semplificata l'attenuazione fornita da una struttura, determinati in base alle procedure stabilite dalle norme UNI EN ISO 717 parti 1 e 2. La 717 parte 1 definisce la procedura di calcolo di un indice pesato (indicato con un pedice "w" aggiunto al simbolo), applicabile a tutte le grandezze relative al fono isolamento dei rumori di origine aerea. La parte seconda riguarda le grandezze relative al fono isolamento dei rumori di origine impattiva. La grandezza fondamentale per la descrizione dell'isolamento dai rumori di origine aerea è il potere fono isolante di un elemento di separazione (in decibel, dB), definito dalla norma UNI EN ISO 140-3, in

forma logaritmica, come il rapporto tra potenza sonora W_1 incidente sull'elemento e la potenza sonora W_2 trasmessa attraverso di esso:

$$R = 10 \log_{10} \frac{W_1}{W_2} \quad (0)$$

In linea del tutto generale il rumore irradiato in un ambiente da un elemento di separazione può essere considerato come la somma dei contributi R_{ij} trasmessi per via diretta e di quelli trasmessi per via strutturale attraverso percorsi laterali. Ogni percorso può essere identificato dall'elemento "i" che trasmette il suono nell'ambiente emittente e dall'elemento "j" che lo irradia nell'ambiente ricevente. I percorsi sono illustrati nella figura seguente, dove nell'ambiente emittente i prodotti "i" sono definiti con "F" per l'elemento laterale e "D" per l'elemento di separazione e nell'ambiente ricevente i prodotti "j" sono definiti con "f" per un elemento laterale e con "d" per l'elemento di separazione.



In accordo con la norma UNI EN 12354-1, si calcola, in base alla serigrafia delle strutture e alle proprietà dei materiali utilizzati, il potere sconsolante apparente di un elemento di edificio R' (dB) secondo la relazione:

$$R' = -10 \log \left[10^{-\left(\frac{R_{Dd}}{10}\right)} + \sum_{F=f=1}^n 10^{-\left(\frac{R_{Ff}}{10}\right)} + \sum_{f=1}^n 10^{-\left(\frac{R_{Df}}{10}\right)} + \sum_{F=1}^n 10^{-\left(\frac{R_{Fd}}{10}\right)} \right] \quad (0.1)$$

In cui R_{ij} è il potere con isolante, relativo al percorso ij-esimo:

- R_{Dd} è il potere con isolante per trasmissione diretta in dB;

- R_{Ff} è il potere fonoisolante per trasmissione laterale per i percorsi di trasmissione Ff , in dB;
- R_{Df} è il potere fonoisolante per la trasmissione laterale per i percorsi di trasmissione Df , in dB;
- R_{Fd} è il potere fonoisolante per la trasmissione laterale per i percorsi di trasmissione Fd , in dB;
- n è il numero di elementi laterali in un ambiente.

per quanto riguarda l'isolamento dai rumori di origine impattiva, la norma UNI-EN-ISO 140 parte sette definisce il livello di pressione sonora da calpestio L'_n , normalizzato rispetto all'assorbimento acustico, come il livello medio di pressione sonora (in dB) misurato nell'ambiente ricevente, corretto con i termini di normalizzazione e tiene conto delle proprietà assorbenti nell'ambiente interno (A è l'aria di assorbimento equivalente dell'ambiente e A_0 è l'aria di assorbimento equivalente di riferimento, il 10 m^2):

$$L'_n = L_i + 10 \log_{10} \frac{A}{A_0} \quad (0.2)$$

l'isolamento acustico di facciata, $D_{2m,nT}$ (dB), normalizzato rispetto al tempo di riverberazione, è definito, secondo quanto riportato nella UNI EN ISO 140-5, come differenza fra il livello di pressione sonora esterno a 2 m dalla facciata, prodotto da rumore da traffico, se questo è prevalente, o da altoparlante con incidenza del suono di 45° sulla facciata ($L_{1,2m}$), ed il livello di pressione sonora medio dell'ambiente ricevente (L_2); a questo va aggiunto il termine di normalizzazione per tenere conto delle proprietà riverberanti dell'ambiente interno (T il tempo di riverberazione dell'ambiente e T_0 è il tempo di riverberazione di riferimento, pari a 0,5 s nelle abitazioni):

$$D_{2m,nT} = D_{2m} + 10 \log_{10} \left(\frac{T}{T_0} \right) = L_{1,2m} - L_2 + 10 \log_{10} \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad (0.3)$$

La norma UNI EN 12354-3 definisce il potere sconsolante apparente della facciata e un campo sonoro incidente diffuso come:

$$R' = -10 \log \left(\sum_{i=1}^n t_{e,i} + \sum_{f=1}^n t_f \right) \quad (0.4)$$

Dove:

$t_{e,i}$ è il fattore di trasmissione relativo alla potenza irradiata da un elemento di facciata;

t_f è il fattore di trasmissione relativo alla potenza irradiata da un elemento laterale nell'ambiente ricevente.

Il riferimento legislativo per la definizione dei requisiti prestazionali è il decreto del presidente del consiglio dei ministri del 5 dicembre 1997, "determinazione dei requisiti acustici passivi degli edifici". Il decreto effettua una divisione in classi degli ambienti abitativi in base alla loro destinazione d'uso:

- categoria A: edifici adibiti a residenza o assimilabili;
- categoria B: edifici adibiti a uffici e assimilabili;
- categoria C: edifici adibiti a alberghi, pensioni ed attività assimilabili;
- categoria D: edifici adibiti a ospedali, cliniche, case di cura e assimilabili;
- categoria F: edifici adibiti a attività ricreative o di culto o assimilabili;
- categoria G: edifici adibiti ad attività commerciali o assimilabili.

Per ciascuna classe sono fissati i requisiti minimi di fono isolamento delle costruzioni edilizie con indici di valutazione delle grandezze citate, nei confronti sia dei rumori provenienti dall'esterno, sia di quelli provenienti dall'interno si fa riferimento alla tabella riportata nel capitolo legislativo. Si da conto del fatto che, mentre i limiti su R'_w e $D_{2m,nT,W}$ sono da intendersi come valori minimi, quelli relativi a $L'_{n,W}$ sono invece dei valori massimi.

2.1.2 Potere fono isolante di divisori e pareti

2.1.2.1 Trasmissione del suono per via "solida"

Le onde sonore, si propagando attraverso un mezzo elastico, subiscono fenomeni di riflessione, trasmissione, dissipazione e diffrazione in corrispondenza di qualsiasi discontinuità del mezzo di propagazione. L'attenuazione della potenza sonora che si verifica tra due ambienti separati da un divisorio o da una parete costituisce una tipica manifestazione di questi fenomeni. I termini del tutto generali, si definisce coefficiente (o fattore) di trasmissione della potenza sonora di una struttura il rapporto tra la Potenza incidente su di essa W_i e quella che la attraversa W_t :

$$\tau = \frac{W_t}{W_i} \quad (0.5)$$

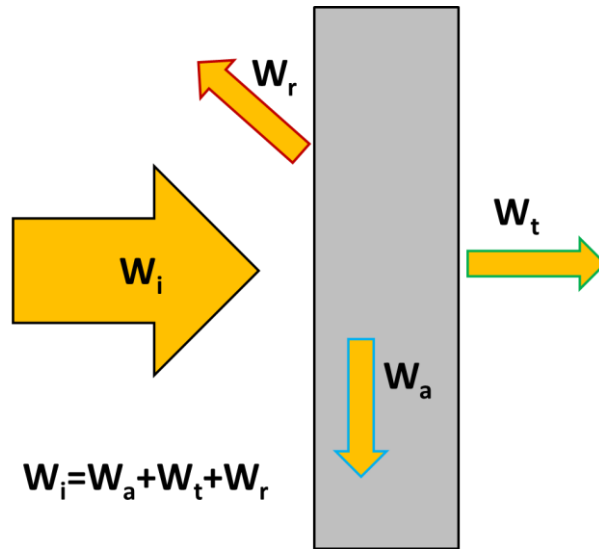


Figura 2-2

tale coefficiente dipende dalla direzione di incidenza delle onde sulla struttura. In acustiche edilizia, l'ipotesi di incidenza diffusa è sufficientemente rappresentativa nella gran parte delle situazioni pratiche. A differenza dei mezzi fluidi, attraverso i quali

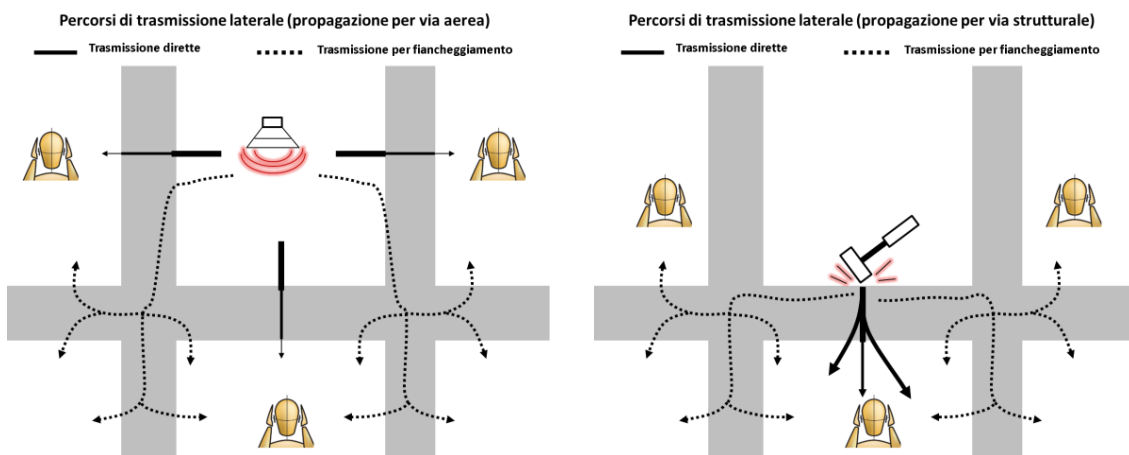


Figura 2-3 (percorsi per via aerea)

Figura 2-4 (percorsi per via strutturale)

possono propagarsi solo onde di tipo longitudinale, i mezzi solidi sono in grado di trasmettere anche con onde trasversali (ad esempio, flessionali, torsionali, superficiali). Per questo motivo, i coefficienti di trasmissione dipende da numerose caratteristiche strutturali dei materiali: massa, rigidità e smorzamento. Inoltre, se, come sempre avviene, la struttura ha dimensioni finite e ed è inserita in un sistema complesso di strutture, il fenomeno della trasmissione sarà legato anche alle dimensioni geometriche e alla natura dei vincoli che la collegano alle altre strutture. Tutti questi parametri, infatti, influenzano i cosiddetti "modi" di vibrazione della struttura, ossia la sua risposta

nei confronti di una forza eccitante. Le proprietà di attivazione di un divisorio o parete sono solitamente espresse con una grandezza logaritmica (in db), il potere fonoisolante R . (si veda la "0") per meglio gestire l'ampio campo di variabilità che occorre nelle applicazioni pratiche. Nel seguito sono proposti alcuni modelli previsionali per la determinazione del potere fonoisolante delle più ricorrenti strutture edilizie.

2.1.2.2 Modelli previsionali per divisori semplici e a più strati

Sotto le ipotesi semplificate di divisorio infinitamente esteso, omogeneo ed isotropo, di massa m , per unità di superficie e di spessore trascurabile rispetto alla lunghezza d'onda del suono incidente (parente "sottile"), è possibile ricavare un'espressione del potere fonoisolante nei confronti di onde piane di frequenza f incidente un certo angolo θ rispetto alla normale; in particolare, qualora gli effetti della rigidità e dello smorzamento siano trascurabili, ossia per frequenze sufficientemente elevate, tale espressione assume una forma particolarmente semplice, dipendente solo dalla massa superficiale:

$$R(0) = 10 \log_{10} \left[1 + \left(\frac{\pi \cdot f \cdot m \cdot \cos \theta}{\rho_0 \cdot c} \right)^2 \right] \approx 20 \log_{10}(f \cdot m \cdot \cos \theta) - 42 \quad (0.6)$$

Essendo c la velocità di propagazione delle onde in aria e ρ_0 la densità dell'aria in condizioni stazionarie. La (0.6) prende il nome di "legge della massa" e, sebbene possa applicarsi ai fini previsionali solo in un intervallo limitato di frequenze, è coerente con due importanti evidenze sperimentali:

- ad un raddoppio della massa superficiale m corrisponde un aumento di 6 dB del potere fonoisolante, a parità di frequenza;
- per una data struttura, il potere fonoisolante aumenta con la frequenza di 6 dB per ottava, ossia ad un raddoppio della frequenza.

La legge della massa può essere anche estesa alla condizione di campo incidente diffuso a partire da quella per incidenza normale mediante la seguente:

$$R = 20 \log_{10}(f \cdot m) - 47 \quad (0.7)$$

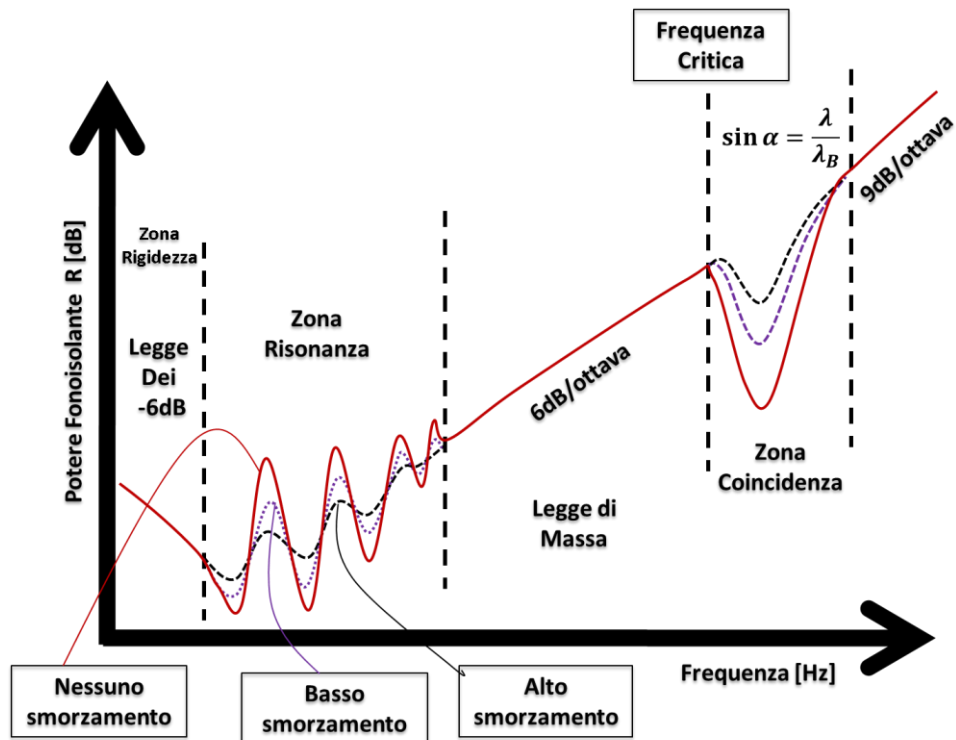


Figura 2-5 (andamento del potere fonoisolante alle diverse frequenze)

Le principali deviazioni della legge della massa (si veda la Figura 2-5) si verificano a causa dell'efficienza di radiazione e dei fenomeni di risonanza (molti propri) dei divisori reali di dimensioni finite e nelle possibilità, caratteristica dei solidi, di poter essere sede di onde flessionali. In virtù di questo ultimo fenomeno, è possibile individuare una particolare frequenza, detta "frequenza critica", per la quale la lunghezza delle onde trasversali che si propagano nel divisorio, coincide con quella delle onde longitudinali che si propagano in aria (da qui il nome di "coincidenza"):

$$f_c = \frac{c}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{12m(1-\nu^2)}{E \cdot s^3}} \quad (0.8)$$

essendo E il modulo di Young, ν il rapporto di Poisson e s lo spessore del pannello. il prodotto della frequenza critica e dello spessore di un pannello dipende solo dalle proprietà dei materiali, come riportato in tabella.

Tabella 1

Materiale	Massa Volumica (kg/m ³)	Fs (m/s)
Acciaio	7700	12.5
Alluminio	2700	12.5
Vetro pyrex	2300	12.5

Perspex	1150	30.5
Calcestruzzo	2600	21.5
Poliuretano	72	127.5
Polistirene	42	127.5
PVC	66	71.5
Gomma	1100	45.0
Mattoni pieni	1900	22.0
Legno massiccio	650	15.2
Legno compensato	600	21.2
Legno truciolare	750	97.7
Cartongesso	650	9.5

Al di sopra di tale frequenza, la legge della massa (0.7) dev'essere corretta per tener conto della trasmissione risonante; le proprietà di smorzamento, ossia di dissipazione all'interno del materiale divengono, in questo campo di frequenze, particolarmente importanti:

$$R = 20 \log_{10}(f \cdot m) + 10 \log_{10}\left(\frac{\eta \cdot f}{f_c}\right) - 44 \quad (0.9)$$

Essendo η il fattore di smorzamento. Quest'ultima grandezza è piuttosto difficile da valutare sperimentalmente e dipende da numerosi fattori: ciò costituisce una debolezza intrinseca di qualsiasi modello previsionale del potere fonoisolante; d'altra parte, un valore di η dell'ordine di 10^{-2} può considerarsi rappresentativo di molti materiali impiegati in edilizia (ad eccezione dei metalli). Una correzione empirica delle espressioni (0.7) e (0.9) nell'intervallo di frequenze comprese tra $f_c/2$ e f_c e tenendo conto del fenomeno degli effetti di bordo, può essere compiuta interpolando linearmente i valori forniti dalle suddette espressioni agli estremi dell'intervallo. Alle basse frequenze, la legge della massa (0.7) conduce genericamente a una sottostima del potere fonoisolante; ciò è imputabile al fatto che, per le dimensioni tipiche delle pareti impiegate in edilizia, è necessario tenere in conto l'efficienza di radiazione delle onde forzate. Ciò si può fare, usando nell'intervallo di frequenze al di sotto di $f_c/2$, la seguente espressione al posto della legge della massa:

$$R = 20 \log_{10} \left(\frac{\pi f m'}{\rho_0 c} \right) + 20 \log_{10} \left[1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right] - 10 \log_{10} \left[\ln(k\sqrt{A}) - U(\Lambda) + \frac{1}{4\pi A k_0^2} + 0.16 \right] \quad (0.10)$$

Essendo A l'aria del pannello, k_0 il numero d'onda e $U(\Lambda)$ la funzione di correzioni di forma, con Λ rapporto tra le lunghezze dei lati del pannello. La (0.10) non tiene conto della trasmissione risonante, ma tipicamente il contributo di questa è di vari ordini di grandezza inferiore rispetto a quello della trasmissione forzata. Le relazioni (0.9) e (0.10) sono state derivate nell'ipotesi di divisorio sottile rispetto alla lunghezza d'onda; e ipotesi non è adeguata in presenza di strutture di elevata massa superficiale e di spessore significativo (esempio, solai in calcestruzzo e in mattoni). In questi casi, infatti, le onde di taglio divengono predominanti alle alte frequenze e ciò comporta un aumento di R di soli 6dB per ottava al di sopra della frequenza critica, anziché di 9dB per ottava, come prevedrebbe la (0.9). Molte pareti o divisori sono comunemente realizzati con strati sottili separati da un'intercapedine (esempio a nido d'ape); una progettazione di queste strutture è in grado di fornire prestazioni fonoisolanti nettamente superiori a quelle di una singola lastra di massa superficiale pari alla somma delle masse.

Nell'ipotesi semplificata di due strati omogenei sottili di massa superficiale m_1 e m_2 , separati da un'intercapedine di spessore d , è possibile individuare due frequenze fondamentali e tre intervalli di frequenza per le proprietà fonoisolanti del sistema:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{\rho_0}{d} \right) \left(\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \right)} \quad (0.11)$$

$$f_1 = \frac{55}{d} \quad (0.12)$$

$$R = 20 \log_{10} [f(m_1 + m_2)] - 47 \quad (f < f_1) \quad (0.13)$$

$$R = R_1 + R_2 + 20 \log_{10} [f \cdot d] - 29 \quad (f_0 < f < f_1) \quad (0.14)$$

$$R = R_1 + R_2 + 6 \quad (f > f_1) \quad (0.15)$$

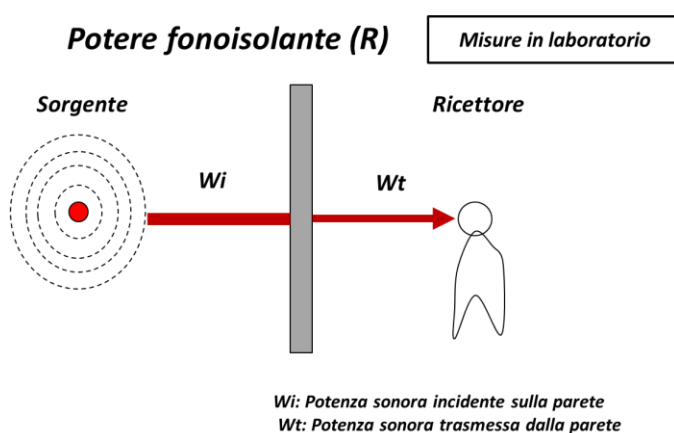
essendo f_0 la sequenza di risonanza elastica del sistema massa-molla-massa e R_1 e R_2 i poteri fonoisolanti delle due lastre, calcolati in base alle precedenti considerazioni. Al di sopra di f_0 , è evidente l'incremento del potere fonoisolante di una parete doppia rispetto a una singola lastra (18 dB per ottava); è consigliabile, perciò, minimizzare la

frequenza di risonanza: ciò può compiersi aumentando lo spessore dell'intercapedine, quello dei pannelli o la loro densità. Le espressioni (0.13), (0.14) e (0.15) sono, a rigore, valide in assenza di interconnessioni tra i pannelli e trascurano le risonanze di ordine superiore del sistema massa molla massa. La presenza di connessioni, molto comuni in edilizia, ha in genere l'effetto di diminuire le prestazioni, dipendendo anche dalla geometria di tali connessioni (una tipologia "per punti" è preferibile a una "per linee"). Un altro fattore che influenza il potere fonoisolante di una parete doppia è rappresentato dalle caratteristiche del materiale eventualmente inserito nell'intercapedine; infatti, un materiale fono assorbente incrementa la dissipazione dell'energia acustica ed è in grado di aumentare il potere fonoisolante di 5-10 dB alle alte frequenze. A questo scopo, l'attenta selezione del materiale di riempimento (anche alla luce di altre esigenze, quali quelle dell'isolamento termico) è di fondamentale importanza nel progetto acustico di un edificio, una volta che le scelte progettuali relative ai materiali da costruzione siano state compiute.

2.1.3 misure in laboratorio e in opera del potere fonoisolante

Il potere fonoisolante definito dalla (0) può essere valutato sperimentalmente con diverse tecniche. Una prima distinzione può essere fatta tra tecniche applicabili in laboratorio e in opera. Le prime sono essenzialmente basate sulla possibilità di trascurare il contributo delle trasmissioni laterali caratteristica delle strutture di laboratorio dette camere riverberanti accoppiate (si veda figura seguente).

Potere fonoisolante, potere fonoisolante apparente ed isolamento acustico



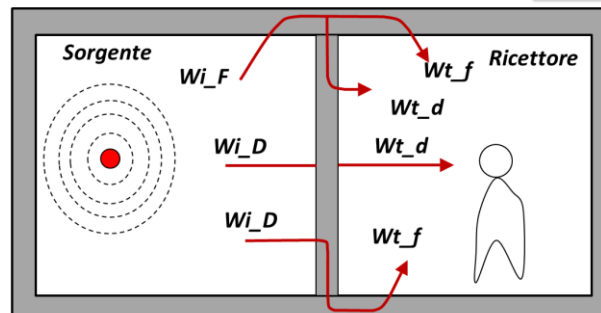
Il potere fonoisolante (R) di un elemento di edificio descrive la sua attitudine a ridurre la trasmissione di energia sonora ed è caratteristico dell'elemento in se stesso

Tali ambienti speciali, caratterizzati da un coefficiente di riflessione delle pareti molto elevato e da un elevato isolamento acustico e strutturale, sono necessari per la valutazione del potere fonoisolanti secondo i metodi descritti dagli standard UNI EN ISO 10140-3 e UNI EN ISO 15186-1. Il metodo descritto dalla norma UNI EN ISO 10140-3 consiste nel valutare la media spaziale del livello di pressione sonora in due camere riverberanti separate dal divisorio oggetto di prova: una, è emittente, contenente una sorgente omnidirezionale, e l'altra detta ricevente. Per tenere conto delle proprietà fonoassorbenti della camera ricevente, è anche necessario compiere una valutazione del tempo di riverberazione all'interno di questa. Il metodo intensimetrico, descritto nella UNI EN ISO 15186-1, si basa sulla determinazione della potenza trasmessa nella camera ricevente attraverso la media spaziale dell'intensità rilevata da una sonda intensimetrica. Quest'ultimo metodo, maggiormente immune nei confronti della trasmissione laterale, può anche applicarsi in opera (UNI EN ISO 15186-2). L'applicazione in opera del metodo della pressione (UNI EN ISO 140-4) conduce alla determinazione del cosiddetto potere fonoisolante apparente R' , include anche le trasmissioni attraverso le strutture laterali, sempre presenti nelle situazioni reali (si veda la figura seguente).

Potere fonoisolante, potere fonoisolante apparente ed isolamento acustico

Potere fonoisolante apparente (R')

Misure in opera



W_{i_D} : Potenza sonora incidente sul sistema costruttivo considerato;
 W_{t_d} : Potenza sonora trasmessa dal sistema costruttivo considerato;
 W_{i_F} : Potenza sonora incidente sulle strutture di contorno al sistema costruttivo considerato;
 W_{t_f} : Potenza sonora trasmessa dalle strutture di contorno al sistema costruttivo considerato;

Il potere fonoisolante apparente (R') è analogo al potere fonoisolante, ma tiene conto anche dell'energia acustica trasmessa lateralmente attraverso le strutture che delimitano l'elemento considerato

Per questo motivo, nonché per l'influenza delle modalità di posa in opera dei materiali, il potere fonoisolante apparente R' in opera può differire in maniera significativa dal corrispondente valore valutato in laboratorio (R).

2.2 Aspetto normativo e scientifico

In questa parte della ricerca sono riportate le principali norme unificate nazionali ed europee inerenti in calcolo previsionale gli aspetti energetici, acustici e di illuminazione naturale degli edifici.

2.2.1 Acustica edilizia

Dalla ricerca effettuata, sui principali testi di riferimento, sulle pubblicazioni scientifiche nazionali ed internazionali si può affermare che a livello di requisiti acustici passivi lo stato dell'arte sui modelli previsionali è rappresentato dalla normativa UNI ed EN di riferimento. Più precisamente si fa riferimento alle norme della serie UNI EN 12354 e al rapporto tecnico del Ente nazionale di unificazione UNI TR 11175 che riporta un metodo previsionale semplificato dei soli aspetti legati all'involucro e ai componenti edilizi; mentre niente dice sul rumore prodotto dagli impianti in dotazione all'edificio. Di seguito si analizzano le diverse norme e si riportano le principali equazioni prese in considerazione per la ricerca.

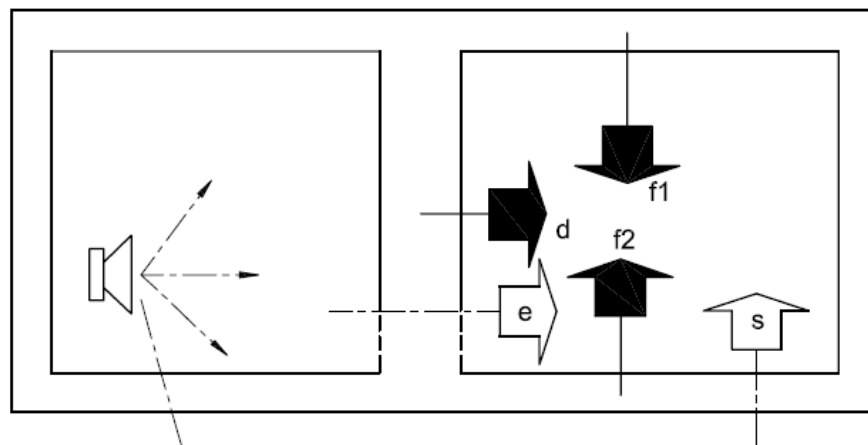
2.2.1.1 Norme della serie UNI EN 12354 "Valutazione delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti".

- 12354 parte 1 "Isolamento dal rumore per via aerea tra ambienti".

La norma riporta al suo interno modelli di calcolo dettagliati e modelli di calcolo semplificati basati sugli indici di valutazione. I modelli descritti si basano sulle seguenti equazioni:

Potere fonoisolante apparente

$$R' = -10 \log \tau' \quad [dB] \quad (1)$$



Fattore di trasmissione

$$\tau' = \tau_d + \sum_{f=1}^n \tau_f + \sum_{e=1}^m \tau_e + \sum_{s=1}^k \tau_s \quad (1.1)$$

Dove:

τ' è il fattore di trasmissione definito come rapporto fra potenza incidente e potenza totalmente trasmessa dalla parte opposta del sistema costruttivo nel ambiente ricevente;

τ_d è il fattore di trasmissione che comprende il contributo dato dai percorsi Dd ed Fd;

τ_f è il fattore di trasmissione che comprende il contributo dato dai percorsi Fd ed Df;

τ_e è il fattore di trasmissione dovuto al rumore aereo che incide sulla parete e da essa direttamente trasmesso nell'ambiente ricevente;

τ_s è il fattore di trasmissione indiretta per via aerea dovuto alla trasmissione tramite un sistema s (per esempio pareti laterali e ambiente adiacente)

$$\tau_d = \tau_{Dd} + \sum_{F=1}^n \tau_{Fd} \quad (1.2)$$

$$\tau_f = \tau_{Df} + \tau_{Ff} \quad (1.3)$$

$$\tau_{Dd} = 10^{-\frac{R_{Dd}}{10}} \quad (1.4)$$

$$\tau_{ij} = 10^{-\frac{R_{ij}}{10}} \quad (1.5)$$

$$\tau_e = \frac{A_o}{S_s} 10^{-\frac{D_{ne}}{10}} \quad (1.6)$$

$$\tau_s = \frac{A_o}{S_s} 10^{-\frac{D_{ns}}{10}} \quad (1.7)$$

Tutti i calcoli possono essere effettuati a frequenze più alte e più basse rispetto all'intervallo in bande di terzi di ottava compreso fra i 100 Hz e i 3150 Hz; tuttavia la norma precisa che per le basse frequenze non ci sono informazioni disponibili sull'attendibilità dei valori previsionali ottenuti;

- **Modello dettagliato per trasmissione per via strutturale R_{Dd} e R_{ij}**

I dati d'ingresso per gli elementi strutturali compresi gli eventuali strati addizionali e i giunti, devono essere convertiti in valori riscontrabili in opera mediante le seguenti equazioni.

$$R_{situ} = R - 10 \log \frac{T_{s,situ}}{T_{s,lab}} [dB] \quad (2)$$

La norma specifica che per alcuni elementi dell'edificio, si deve considerare il tempo di riverberazione strutturale $T_{s,situ} = T_{s,lab}$ il che comporta una correzione pari a 0 dB.

Elementi dell'edificio per i quali $T_{s,situ} = T_{s,lab}$:

- elementi leggeri doppio strato, come i muri montanti a struttura in legno o metallica;
- elementi con un fattore di smorzamento maggiore di 0,03;
- elementi molto più leggeri degli elementi strutturali circostanti (per un fattore almeno di tre);
- elementi che non sono saldamente collegati con gli elementi strutturali circostanti.

Approfondimenti sul Tempo di riverberazione strutturale (appendice C) della 12354-1

Per gli strati addizionali, il valore di laboratorio può essere usato come un'approssimazione del valore in opera ΔR_{situ} .

$$\Delta R_{situ} = \Delta R [dB] \quad (3)$$

Determinazione della trasmissione diretta e laterale in opera

$$R_{Dd} = R_{d,situ} + \Delta R_{D,situ} + \Delta R_{d,situ} [dB] \quad (4)$$

$$R_{ij} = \frac{R_{i,situ}}{2} + \Delta R_{i,situ} + \frac{R_{j,situ}}{2} + \Delta R_{j,situ} + D_{v,ij,situ} + 10 \log \frac{S_s}{\sqrt{S_i S_j}} [dB] \quad (4a)$$

Considerando in prima approssimazione pari a zero i tempi di riverberazione strutturali possiamo scrivere:

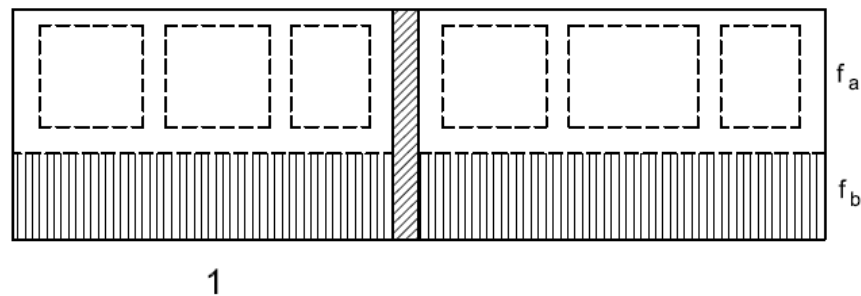
$$R_{ij} = \frac{R_i}{2} + \Delta R_i + \frac{R_j}{2} + \Delta R_j + K_{ij} + 10 \log \frac{S_s}{\sqrt{S_i S_j}} [dB] \quad (4b)$$

Un'altra equazione identica alla (4a) è la seguente:

$$R_{ij} = R_{i,situ} + \Delta R_{i,situ} + R_{j,situ} + \Delta R_{j,situ} + D_{v,ij,situ} + 10 \log \frac{S_s}{S_j} + 10 \log \frac{\sigma_{i,situ}}{\sigma_{j,situ}} \text{ [dB]}$$

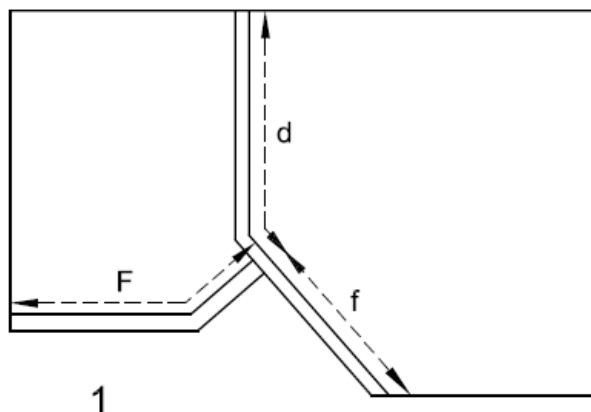
Interpretazioni per i diversi tipi di elementi

Vista laterale

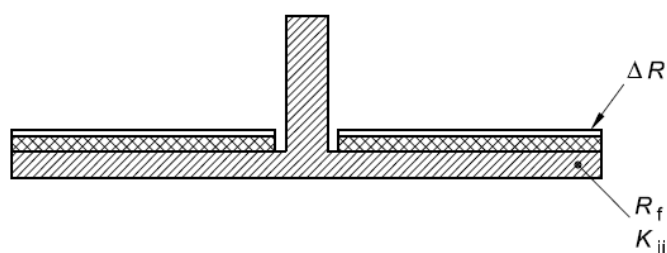


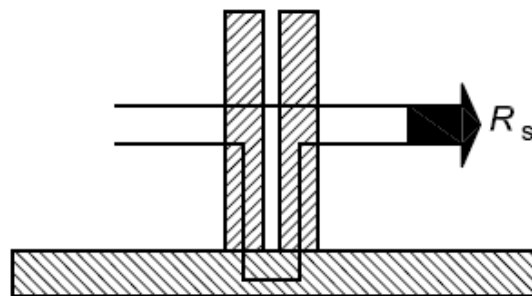
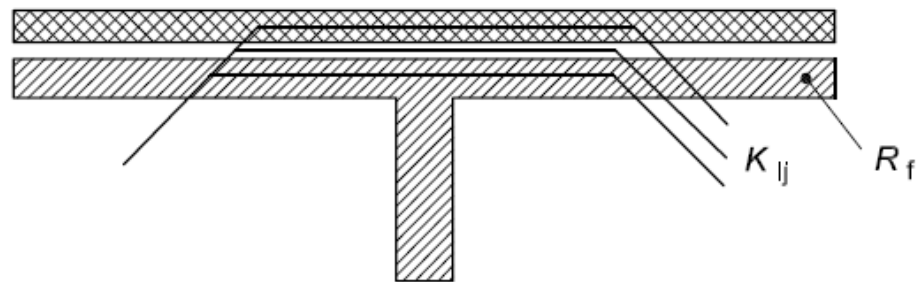
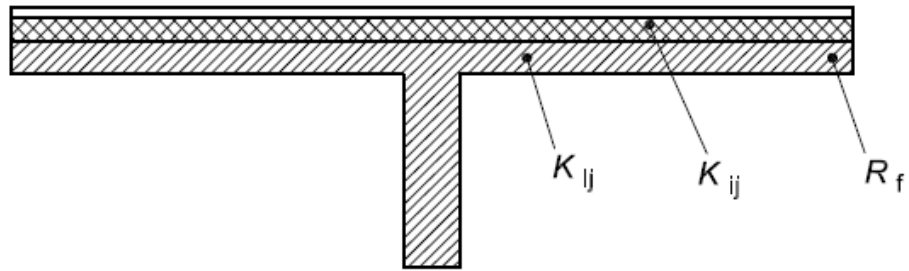
La figura su riportata, evidenzia la suddivisione delle aree della parete in funzione dei differenti tipi di elementi che la compongono. Nel caso specificato si suddivide la parete in parte finestrata e non finestrata.

Sezione trasversale orizzontale



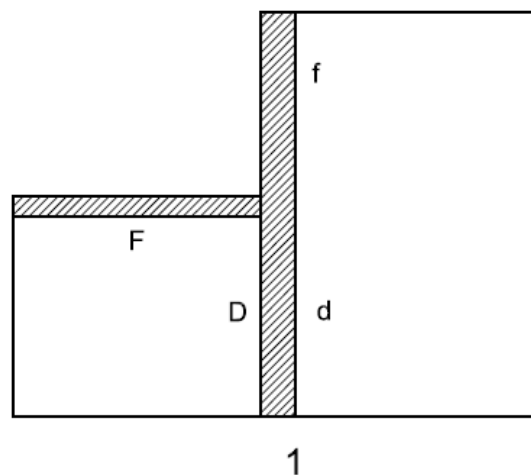
La figura evidenzia come devono essere considerate le pareti continue non lineari che formano angoli maggiori di $\pi/2$, per il corretto utilizzo del modello di calcolo descritto dalle norme UNI EN 12354.



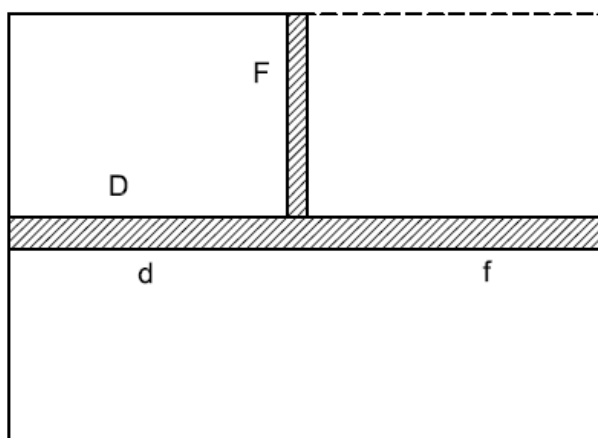


Le figure riportate evidenziano le diverse componenti che bisogna tenere in considerazione.

Sezione trasversale orizzontale



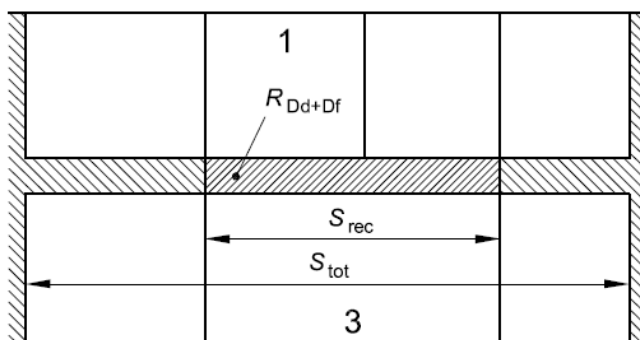
Sezione trasversale verticale



2

Legenda

- 1 Ambiente emittente
- 2 Sezione trasversale verticale
- 3 Ambiente ricevente



2

Limiti del modello

- a) Il modello può essere usato solo per combinazioni di elementi per cui si conosce l'indice di riduzione delle vibrazioni o lo si può valutare dai valori noti;
- b) il modello è applicabile solo per gli elementi strutturali di base che hanno approssimativamente le stesse caratteristiche di irradiazione per entrambi i lati;
- c) con pavimenti molto ampi, pavimenti con colonne e pareti interne leggere, il pavimento di un ambiente non può più essere considerato un elemento indipendente, pertanto l'incorporamento in conformità con il modello può essere considerato solo una valutazione approssimativa;

- d) viene trascurato il contributo dei percorsi di trasmissione secondari comportanti più di un giunto. Ciò è parzialmente compensato dai valori per l'indice di riduzione delle vibrazioni per quanto gli stessi siano basati su misurazioni in opera, ma, in altri casi, potrebbe causare una sottovalutazione della trasmissione laterale con elementi omogenei. Questi percorsi di trasmissione secondari possono divenire importanti quando strati addizionali vengono applicati a gran parte degli elementi;
- e) il modello descrive solo la trasmissione tra due ambienti adiacenti.

- **Modello dettagliato per trasmissione per via aerea**

Determinazione a partire dalla trasmissione diretta misurata per piccoli elementi

$$D_{n,e,situ} = D_{n,e} \quad (5)$$

Dove:

$D_{n,e}$ isolamento acustico normalizzato di piccoli elementi

$D_{n,e,situ}$ isolamento acustico normalizzato di piccoli elementi applicato in situ nelle stese condizione del laboratorio.

Determinazione a partire dalla trasmissione indiretta misurata

Non esistono, secondo la norma, metodi normati per calcolare la trasmissione indiretta per via aerea $D_{n,s}$ per i sistemi di trasmissione nel loro insieme. La trasmissione indiretta è sempre un mix tra via aerea e via strutturale dove solitamente la seconda prevale sulla prima. L'unico metodo attualmente normato, per la misura dell'isolamento acustico, parrebbe quello per i controsoffitti. Per una stima previsionale la norma rimanda all'allegato F dove sono riportate le seguenti equazioni e i seguenti schemi di calcolo:

Trasmissione indiretta per via aerea

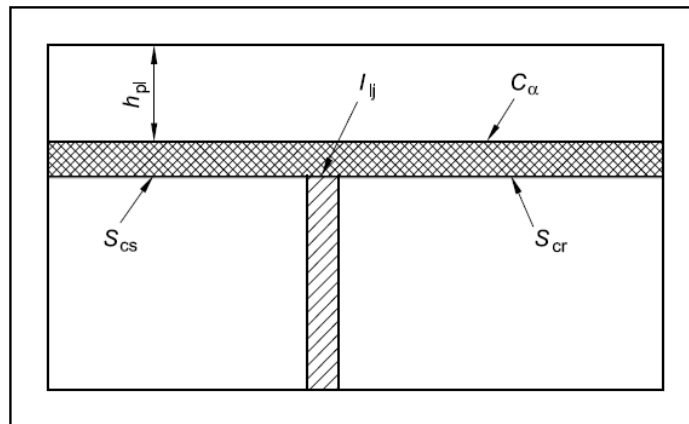
$$D_{n,s} = D_{n,f} + 10 \log \frac{h_{pl} l_{ij}}{h_{lab} l_{lab}} + 10 \log \frac{S_{cs,lab} S_{cr,lab}}{S_{cs} S_{cr}} + C_{\alpha} \quad [dB] \quad (6)$$

Dove:

S_{cs}, S_{cr} è l'area del soffitto rispettivamente nell'ambiente emittente e nell'ambiente ricevente, in metri quadri; in laboratorio, come riferimento, con il pedice "lab", che per i laboratori ISO può essere considerato $S_{cs,lab} = S_{cr,lab} = 20 \text{ m}^2$;

- h_{pl} è l'altezza libera dello spazio vuoto sopra il soffitto, in metri; in laboratorio, come riferimento, questo è " h_{lab} " che per i laboratori ISO può essere considerato $h_{lab} = 0,7$ m;
 t_a è lo spessore del rivestimento assorbente nello spazio vuoto, in metri;
 c_o è la velocità del suono nell'aria, in metri al secondo; $c_o = 340$ m/s.
 C_α è da terminare secondo assorbimento del rivestimento.

Rappresentazione delle grandezze importanti per la previsione della trasmissione indiretta per via aerea



$$D_{n,f} = L_1 - L_2 - 10 \log \frac{A}{A_o} \quad (6.1)$$

Dove:

- L_1 è il livello medio di pressione sonora nell'ambiente emittente, in decibel;
 L_2 è il livello medio di pressione sonora nell'ambiente ricevente dovuto soltanto al suono trasmesso dalla costruzione laterale considerata, in decibel;
 A_o è l'area di assorbimento equivalente sonora, nell'ambiente ricevente, in metri quadri; valore di riferimento $A_o = 10$ m².

Trasmissione laterale

La seguente equazione è da utilizzare nel caso la trasmissione per via aerea sia quella principale per stimare il potere fonoisolante laterale R_{Ff}

$$D_{Ff} = D_{n,f} + 10 \log \frac{S_s l_{lab}}{A_o l_{Ff}} + 10 \log \frac{T_{s,F,lab}}{T_{s,F}} + 10 \log \frac{T_{s,f,lab}}{T_{s,f}} \quad [dB] \quad (6.2)$$

Determinazione della trasmissione indiretta per via aerea partendo da una trasmissione nota per i singoli elementi di un sistema:

Atrio o corridoio

$$D_{n,s} = D_{n,h} = R_{h,s} + R_{h,r} + 10 \log \frac{A_h A_o}{S_{hs} S_{hr}} C_{doorposition} [dB] \quad (6.3)$$

Dove:

R_{hs} è il potere fonoisolante della parete tra un atrio e l'ambiente emittente, in decibel;

R_{hr} è il potere fonoisolante della parete tra un atrio e l'ambiente ricevente, in decibel;

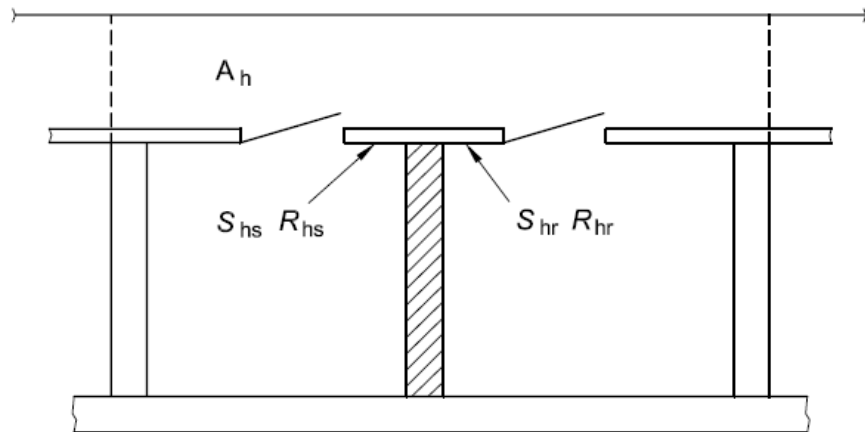
S_{hs} è l'area della parete tra l'atrio e l'ambiente emittente, in metri quadri;

S_{hr} è l'area della parete tra l'atrio e l'ambiente ricevente, in metri quadri;

A_h è l'area di assorbimento equivalente di un atrio, in metri quadri;

$C_{doorposition}$ è un termine di correzione per tenere conto dell'effetto dell'orientamento delle porte, una rispetto all'altra.

Rappresentazione di due ambienti lungo un corridoio con grandezze rilevanti



Sistema di ventilazione

Secondo quanto riportato nella norma l'isolamento acustico normalizzato per trasmissione diretta per via aerea, $D_{n,s}$, per i sistemi di ventilazione potrebbe essere valutato dalla perdita di trasmissione attraverso gli elementi interessati, quali le curvature, le griglie, i silenziatori, nonché le variazioni di area.

- **Modello semplificato per la trasmissione per via strutturale**

Il modello semplificato, considera solamente la trasmissione per via strutturale e consente la stima previsionale dell'indice di valutazione riferito alla frequenza di 500 Hz partendo dai valori degli indici dei singoli sistemi costruttivi e dei relativi indici di riduzione delle vibrazioni K_{jj}

$$R'_w = -10 \log \left[10^{-\frac{R_{Dd,w}}{10}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{-\frac{R_{Ff,w}}{10}} + \sum_{f=1}^n 10^{-\frac{R_{Df,w}}{10}} + \sum_{F=1}^n 10^{-\frac{R_{Ff,w}}{10}} \right] [dB] \quad (7)$$

dove:

- $R_{Dd,w}$ è l'indice di valutazione del potere fonoisolante per la trasmissione diretta, in decibel;
- $R_{Ff,w}$ è l'indice di valutazione del potere fonoisolante laterale per il percorso di trasmissione Ff, in decibel;
- $R_{Df,w}$ è l'indice di valutazione del potere fonoisolante laterale per il percorso di trasmissione Df, in decibel;
- $R_{Fd,w}$ è l'indice di valutazione del potere fonoisolante laterale per il percorso di trasmissione Fd, in decibel;
- n è il numero di elementi laterali in un ambiente; di solito $n = 4$, ma può essere minore o maggiore, a seconda del progetto e della costruzione della situazione presa in considerazione.

- 12354 parte 2 “Isolamento acustico al calpestio tra ambienti”.

La 12354 parte 2 riporta dei metodi per il calcolo previsionale del livello di pressione sonora di calpestio. Nella norma sono presenti un modello dettagliato in bande di frequenza, applicabile sia ad ambienti sovrapposti sia adiacenti, e un metodo semplificato a singolo indice, applicabile solo agli ambienti sovrapposti.

Livello di pressione sonora di calpestio normalizzato rispetto all'assorbimento acustico, L'_n :

$$L'_n = L_i - 10 \log \frac{A}{A_o} [dB] \quad (8. a)$$

Livello di pressione sonora di calpestio normalizzato rispetto all'assorbimento acustico rispetto al tempo di riverberazione, L'_{nT}

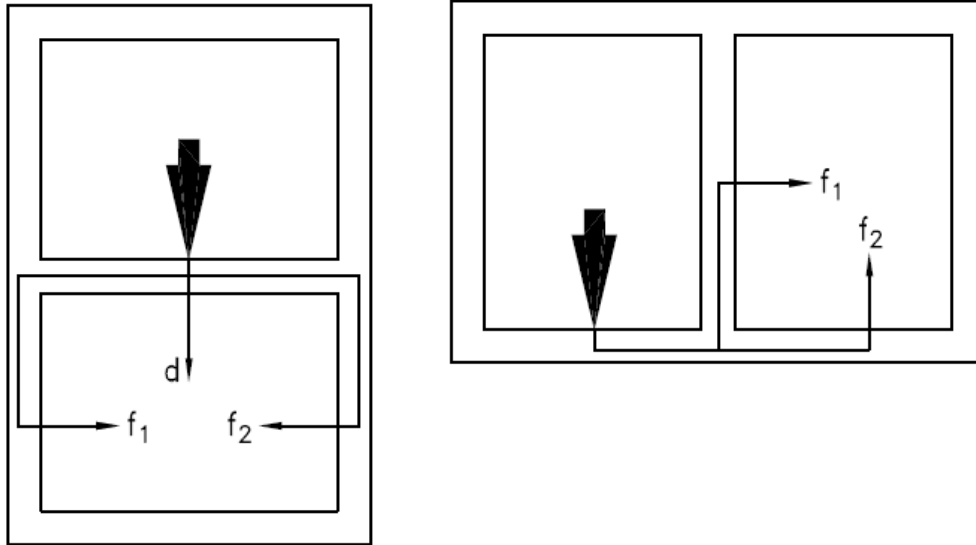
$$L'_{nT} = L_i - 10 \log \frac{T}{T_o} [dB] \quad (8. b)$$

Relazione fra le due grandezze 8.a e 8.b:

$$L'_{nT} = L'_n - 10 \log \frac{0.16V}{A_o T_o} = L'_n - 10 \log 0.032V [dB] \quad (8)$$

Modello di Calcolo

Definizione delle diverse vie di trasmissione sonora tra due ambienti, rispettivamente sovrapposti e adiacenti



Per gli ambienti sovrapposti, il modello determina il livello di pressione normalizzato rispetto all'assorbimento acustico con la seguente equazione:

$$L'_n = 10 \log \left(10^{\frac{L_{n,d}}{10}} + \sum_{j=1}^n 10^{\frac{L_{n,i,j}}{10}} \right) [dB] \quad (9.a)$$

Per gli ambienti adiacenti, il modello determina il livello di pressione normalizzato rispetto all'assorbimento acustico con la seguente equazione:

$$L'_n = 10 \log \sum_{j=1}^n 10^{\frac{L_{n,i,j}}{10}} [dB] \quad (9.b)$$

Per le situazioni comuni il numero degli elementi laterali da considerare è $n = 4$ per ambienti sovrapposti e $n = 2$ per ambienti adiacenti.

Per entrambe le equazioni i vari termini hanno il seguente significato:

- $L_{n,d}$ è il livello di pressione sonora di calpestio normalizzato per trasmissione diretta, in decibel;
- $L_{n,i,j}$ è il livello di pressione sonora di calpestio normalizzato per trasmissione laterale, in decibel;
- n è il numero degli elementi

- **Modello dettagliato**

Determinazione della trasmissione diretta

$$L_{n,d} = L_{n,situ} + \Delta L_{situ} - \Delta L_{d,situ} [dB] \quad (9.1)$$

Determinazione della trasmissione laterale

$$L_{n,ij} = L_{n,situ} - \Delta L_{situ} + \frac{R_{i,situ} - R_{j,situ}}{2} - \Delta R_{j,situ} - \overline{D_{v,ij,situ}} - 10 \log \sqrt{\frac{S_i}{S_j}} \quad (9.2)$$

Trasformazione dei dati d'ingresso in valori in opera

Livello di pressione sonora di calpestio:

$$L_{n,situ} = L_n - 10 \log \frac{T_{s,situ}}{T_{s,lab}} [dB] \quad (9.3)$$

Potere fonoisolante:

$$R_{situ} = R - 10 \log \frac{T_{s,situ}}{T_{s,lab}} [dB] \quad (9.4)$$

Per specifiche si veda pag. 7 della UNI EN 12354-2

Limiti

- a) Il modello è applicabile unicamente a combinazioni di elementi il cui indice di trasmissione del giunto è noto o può essere stimato a partire da valori conosciuti;
- b) gli elementi dovrebbero avere approssimativamente le stesse caratteristiche di irradiazione sonora su entrambi i lati;
- c) il contributo delle vie di trasmissione secondarie, che comprendono più di un giunto, è ignorato;
- d) l'attenuazione del livello di pressione sonora di calpestio, ΔL , misurato su un pavimento compatto, conforme a quanto specificato nella EN ISO 140-8, non può essere utilizzato combinato a pavimenti in legno o altri pavimenti compositi leggeri.

- **Modello dettagliato**

Il modello semplificato, così come nel caso del potere fonoisolante, prevede la valutazione a singolo indice. Tale calcolo prevede a sua volta di avere come dati in ingresso gli indici dei diversi componenti edilizi considerati.

$$L'_{n,w} = L_{n,w,eq} - \Delta L_w + K \text{ [dB]} \quad (10)$$

Termine di correzione K per la trasmissione laterale, in decibel

Massa per unità di area dell'elemento divisorio (pavimento) kg/m ²	Massa media per unità di area degli elementi laterali omogenei non ricoperti con rivestimenti supplementari kg/m ²								
	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	1	0	0	0	0	0	0	0	0
150	1	1	0	0	0	0	0	0	0
200	2	1	1	0	0	0	0	0	0
250	2	1	1	1	0	0	0	0	0
300	3	2	1	1	1	0	0	0	0
350	3	2	1	1	1	1	0	0	0
400	4	2	2	1	1	1	1	0	0
450	4	3	2	2	1	1	1	1	1
500	4	3	2	2	1	1	1	1	1
600	5	4	3	2	2	1	1	1	1
700	5	4	3	3	2	2	1	1	1
800	6	4	4	3	2	2	2	1	1
900	6	5	4	3	3	2	2	2	2

Limiti

- a) Il modello è applicabile unicamente alle costruzioni omogenee (muratura in mattoni e/o calcestruzzo) con pavimenti galleggianti o rivestimenti soffici posati su un pavimento omogeneo;
 - b) il modello è applicabile unicamente agli ambienti sovrapposti ed agli ambienti con dimensioni convenzionali per le abitazioni.
- 12354 parte 3 "Isolamento acustico contro il rumore proveniente dall'esterno per via aerea".

Questa parte della norma consente di calcolare in via previsionale l'isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione o rispetto all'assorbimento medio. Come le due parti precedenti anche questa consente il calcolo in frequenza delle diverse grandezze in gioco o in via semplificata il calcolo degli indici di valutazione. Nell'appendice E della norma è stato inoltre riportato un metodo per stimare il livello di pressione sonora interno agli ambienti una volta conosciuto l'isolamento normalizzato di

facciata. Si riportano qui di seguito le principali grandezze definite nella norma per esprimere le prestazioni di un edificio.

Isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione $D_{2m,nT}$:

$$D_{2m,nT} = L_{1,2m} - L_2 + 10 \log \frac{T}{T_0} [dB] \quad (11. a)$$

Isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto all'assorbimento equivalente $D_{2m,n}$:

$$D_{2m,n} = L_{1,2m} - L_2 + 10 \log \frac{A}{A_0} [dB] \quad (11. b)$$

Relazioni tra le grandezze

$$D_{2m,n} = D_{2m,nT} - 10 \log \frac{V}{T_0 A_0} = D_{2m,nT} - 10 \log 0,32V [dB] \quad (11. c)$$

Dove per tutte le equazioni (11):

- $L_{1,2m}$ è il livello medio di pressione sonora alla distanza di 2 m dalla facciata, in decibel;
- T è il tempo di riverberazione nell'ambiente ricevente, in secondi;
- L_2 è il livello medio di pressione sonora nell'ambiente ricevente, in decibel;
- T_0 è il tempo di riverberazione di riferimento, in secondi; per le abitazioni = 0,5 s.
- A_0 è l'area di assorbimento equivalente di riferimento, in metri quadri; per le abitazioni = 10 m²
- V è il volume dell'ambiente ricevente, in metri cubi.

Modello di Calcolo

Il modello calcolo previsionale delle prestazioni acustiche della facciata considera questa composta da diversi elementi quali porte, finestre, pareti, sistemi di aereazione e etc. La prestazione globale è dovuta alla trasmissione sonora attraverso ciascuno di questi elementi. Nel modello descritto dalla norma si considerano le trasmissioni che avvengono attraverso ciascuno degli elementi costituenti la facciata indipendenti le une dalle altre. Il di calcolo è basato sulle seguenti equazioni:

$$D_{2m,nT} = R' - \Delta L_{fs} + 10 \log \frac{V}{6T_0 S} [dB] \quad (12)$$

dove:

- V è il volume dell'ambiente ricevente, in metri cubi;
- S è l'area totale della facciata vista dall'interno (cioè la somma delle aree di tutti gli elementi di facciata), in metri quadri;
- ΔL_{fs} è la differenza del livello di pressione sonora per la forma della facciata, in decibel.

$$R' = -10 \log \left(\sum_{i=1}^n \tau_{e,i} + \sum_{f=1}^m \tau_f \right) [dB] \quad (12.1)$$

dove:

$\tau_{e,i}$ è il fattore di trasmissione della potenza sonora irradiato da un elemento i di facciata, dovuto alla trasmissione diretta del suono incidente su tale elemento, e la potenza sonora incidente sull'intera facciata;

τ_f è il fattore di trasmissione della potenza sonora irradiato da una facciata o da un elemento laterale f nell'ambiente ricevente, dovuta alla trasmissione laterale, e la potenza sonora incidente sull'intera facciata;

n è il numero di elementi della facciata per la trasmissione diretta;

m è il numero degli elementi laterali della facciata.

Trasmissione dovuta ai piccoli elementi:

$$\tau_{e,i} = \frac{A_0}{S} 10^{-\frac{D_{n,e,i}}{10}} \quad (12.2)$$

dove, nei dati d'ingresso,

$A_0 = 10 \text{ m}^2$

$D_{n,e,i}$ è l'isolamento acustico normalizzato di un piccolo elemento i , in decibel;

S è l'area totale della facciata, vista dall'interno (cioè la somma delle aree di tutti gli elementi), in metri quadri.

Trasmissione dovuta ad altri elementi:

$$\tau_{e,i} = \frac{S_i}{S} 10^{-\frac{R_i}{10}} \quad (12.3)$$

Dove:

R_i è il potere fonoisolante dell'elemento i , in decibel;

S_i è l'area dell'elemento i , in metri quadri.

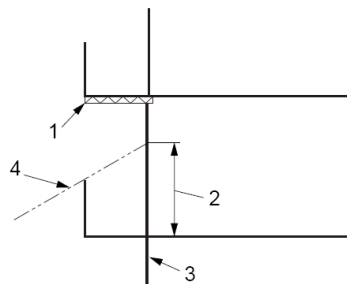
Influenza dovuta alla forma della facciata

L'appendice C della norma riporta una tabella che consente di stimare la differenza di livello di pressione sonora ΔL_{fs} dovuta alla forma della facciata.

Illustrazione dei parametri rilevanti per l'isolamento acustico dovuto alla forma della facciata

Legenda

- 1 Assorbimento
- 2 Altezza dell'orizzonte visivo
- 3 Piano della facciata
- 4 Sorgente sonora



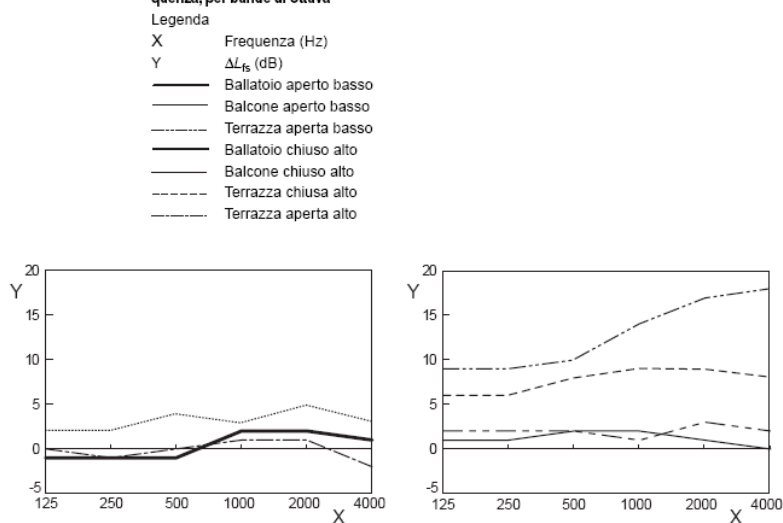
I dati della figura più avanti riportata rappresentano una media ponderata in funzione della frequenza. Tali valori possono essere utilizzati come stima preliminare anche per bande di frequenza; in tal caso i dati sottovalutano l'effetto per le frequenze più elevate per differenze maggiori di 3 dB. La figura più avanti riportata illustra alcuni esempi di dipendenza della frequenza, per bande di ottava.

Isolamento acustico dovuto alla forma della facciata per diverse forme di facciata ed orientamenti della sorgente sonora

ΔL_{fs} dB	1 facciata piana	2 ballatoio			3 ballatoio			4 ballatoio			5 ballatoio					
Assorbimento del tetto (α_w) ⇒	Non applicabile	≤0,3	0,6	≥0,9	≤0,3	0,6	≥0,9	≤0,3	0,6	≥0,9	≤0,3	0,6	≥0,9			
Orizzonte visivo sulla facciata <1,5 m	0	-1	-1	0	-1	-1	0	0	0	1	Non applicabile					
(1,5 - 2,5) m	0	Non applicabile			-1	0	2	0	1	3						
>2,5 m	0				1	1	2	2	2	3	3	4	6			
		6 balcone			7 balcone			8 balcone			9 terrazza					
Assorbimento del tetto (α_w) ⇒		≤0,3	0,6	≥0,9	≤0,3	0,6	≥0,9	≤0,3	0,6	≥0,9	Ringhiera aperta		Ringhiera chiusa			
Orizzonte visivo sulla facciata <1,5 m		-1	-1	0	0	0	1	1	1	2	1	1	1	3	3	3
(1,5 - 2,5) m		-1	1	3	0	2	4	1	1	2	3	4	5	5	6	7
>2,5 m		1	2	3	2	3	4	1	1	2	4	4	5	6	6	7

Le diverse forme di facciata sono indicate da una sezione verticale, il lato esterno si trova a sinistra; gli orientamenti della sorgente sonora sono indicati dall'altezza dell'orizzonte visivo sulla facciata (vedere figura).

figura C.3 **Illustrazione dell'isolamento acustico dovuto alle diverse forme di facciata in funzione della frequenza, per bande di ottava**



Maggiori approfondimenti su Tao e ---appendice B

Limiti

- a) Le differenze di campo sonoro tra le varie condizioni in opera e l'ipotesi di un campo diffuso per la previsione, come nella condizione di laboratorio, causano alcune differenze sistematiche. Si tiene conto della media di tali differenze, riducendo in tal modo l'errore sistematico, mantenendo un certo incremento dell'incertezza della previsione dovuta all'errore casuale.
 - b) Si suppone che la distanza di 2 m dal microfono esterno riduca sufficientemente l'effetto di possibili interferenze causate dalla facciata, poiché il modello di calcolo non tiene conto di tale effetto. In genere, questo è applicabile per le bande di ottava ma l'interferenza potrebbe non essere trascurabile per le bande di terzo di ottava.
- 12354 parte 4 "Trasmissione del rumore interno all'esterno".

Questa parte della norma descrive una procedura di calcolo che segue un approccio differente rispetto alle precedenti, per stimare la prestazione acustica degli edifici. Essa infatti si basa sul calcolo del livello di pressione sonora ad una certa distanza dall'edificio quale misura per valutare la prestazione acustica degli edifici.

La presente parte non sarà tenuta in considerazione all'interno della ricerca svolta

- 12354 parte 5 “Livelli sonori dovuti agli impianti tecnici” (testo inglese).

Questa parte della norma 12354, più recente rispetto alle altre (pubblicata nell'aprile 2009 rispetto al novembre 2002 delle prime tre parti), tratta il calcolo del livello di pressione sonora all'interno degli ambienti dovuto al rumore prodotto dagli impianti di cui l'edificio è dotato. Questa norma è stata recepita dall'UNI in lingua inglese e così è riportata prevalentemente.

Modello di Calcolo

Il modello riportato considera le sorgenti di rumore dovute agli impianti come scomponibili in diverse parti; ciascuna delle quali contribuisce a generare il livello di pressione all'interno degli ambienti considerati. Il modello di calcolo riportato è attualmente monodimensionale.

Si riportano qui di seguito le principali equazioni richiamate dal modello per la previsione dei livelli di pressione dovuti agli impianti.

$$L_n = 10 \log \left[\sum_{i=1}^m 10^{\frac{L_{n,d,i}}{10}} + \sum_{j=1}^n 10^{\frac{L_{n,a,j}}{10}} + \sum_{k=1}^o 10^{\frac{L_{n,s,k}}{10}} \right] [dB] \quad (13)$$

Dove:

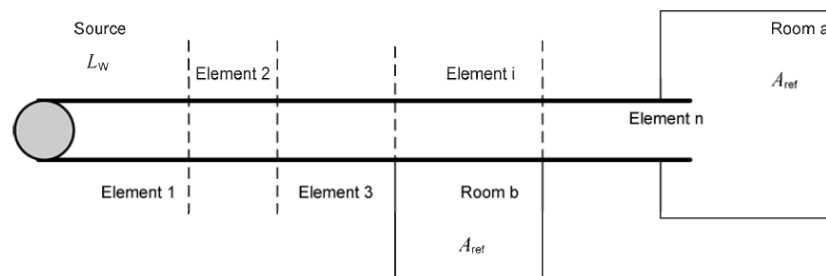
- L_n è il livello di pressione sonora totale normalizzato in una stanza a causa della sorgente sonora i, j e k , espresso in decibel;
- $L_{n,d,i}$ è il livello di pressione sonora normalizzata a causa della trasmissione del rumore attraverso un condotto dalla sorgente, espresso in decibel;
- $L_{n,a,j}$ è il livello di pressione sonora normalizzata per la trasmissione aerea del rumore attraverso la struttura dell'edificio per fonte j , espresso in decibel;
- $L_{n,s,k}$ è il livello di pressione sonora normalizzata a causa della trasmissione del suono attraverso la struttura dell'edificio per fonte k , espresso in decibel;
- m è il numero di fonti sonore relative che trasmettono tramite un condotto la trasmissione;
- n è il numero di sorgenti sonore che trasmettono per via aerea;
- o è il numero fonti sonore che trasmettono per via strutturale.

- **Airborne sound transmission through pipes and ducts**

Each element of a duct system can be a transmission element as well as a sound source. In the predictions each sound source is considered separately and the sources and

elements are considered to be independent, thus interference between elements, modal effects and resonances are neglected.

The normal quantity to express the source strength is the airborne sound power level L_W , injected into the duct. The sound transmission through the duct is described by the sound power level reduction ΔL_W occurring in each distinguishable element of the duct. The resulting sound pressure in a receiving room is either caused by sound radiating at the duct opening (room a) or by sound radiating by the duct itself (room b). The resulting sound pressure level depends on the absorption in that room, which is normalized to $A_{ref} = 10 \text{ m}^2$.



The resulting normalized sound pressure level in a room, $L_{n,d}$, due to a sound source in a duct follows from:

$$L_{n,d} = L_W - \sum_{i=1}^e \Delta L_{W,i} + 10 \log \frac{4}{A_{ref}} \text{ [dB]} \quad (13.1)$$

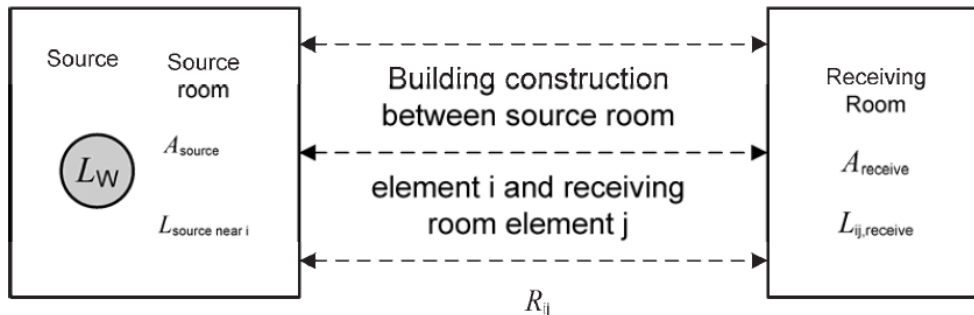
where

- L_W is the sound power level of the source, in decibels;
- $\Delta L_{W,i}$ is the sound power level reduction by element i , in decibels;
- e is the number of elements between source and receiving room;
- A_{ref} is the reference absorption area ($= 10 \text{ m}^2$), in square metres.

- **Airborne sound transmission through building construction**

The basic quantity to express the source strength is the airborne sound power level L_W . The resulting sound pressure level in the source room depends mainly on the absorption in that room A_{source} . However, the room shape will also influence the actual excitation of the structures, the distance between source and structures and the radiation pattern of the source. The transmission from source room to receiving room normally involves the

transmission via various transmission paths between elements (i) of the source room and elements (j) of the receiving room. This transmission can be described by the flanking sound reduction index for that transmission path R_{ij} .



The resulting normalized sound pressure level in a room, $L_{n,a}$, for one sound source follows from:

$$L_{n,a} = 10 \log \sum_{i=1, j=1}^{m,n} 10^{\frac{L_{n,a,ij}}{10}} \text{ [dB]} \quad (13.2)$$

where

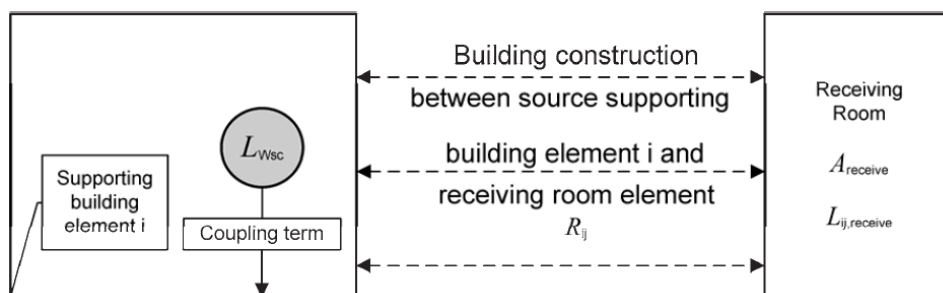
$L_{n,a,ij}$ is the normalized sound pressure level in the receiving room due to an airborne sound source in the source room, as caused by sound transmission from an excited element i in the source room and a radiating element j in the receiving room, in decibels;

m is the number of elements i in the source room participating in the sound transmission;

n is the number of elements j in the receiving room participating in the sound transmission.

- **Structure-borne transmission through building construction**

The sound power injected into the building structure by the source depends on the characteristics of the source, the mounting and the supporting building element. As a general concept this installed structure-borne



sound power $L_{Ws,inst}$ follows from the source strength, given by the characteristic structure-borne sound power level $L_{Ws,c}$ and the coupling term D_c for the supporting element i . The characteristic structure-borne sound power is almost the maximum power a source could inject, the coupling term thus being always positive.

The transmission from source room to receiving room normally involves the transmission via various paths between the supporting building element (i) in the source room and the elements (j) of the receiving room.

This transmission can be described by the flanking sound reduction index for that transmission path R_{ij} taking into account the different excitation mechanisms for airborne and structure-borne sound through the adjustment term D_{sa} .

The resulting normalized sound pressure level in a room, $L_{n,s}$, for one sound source follows from:

$$L_{n,s} = 10 \log \sum_{j=1}^n 10^{\frac{L_{n,s,ij}}{10}} \text{ [dB]} \quad (13.3)$$

where

$L_{n,s,ij}$ is the normalized sound pressure level in the receiving room due to a structure-borne sound source mounted to supporting building element i in the source room caused by sound transmission from element i to a radiating element j in the receiving room, in decibels;

n is the number of elements j in the receiving room participating in the sound transmission.

$$L_{n,s,ij} = L_{Ws,inst,i} - D_{sa,i} - R_{ij,ref} - 10 \log \frac{S_i}{S_{ref}} - 10 \log \frac{A_{ref}}{4} \text{ [dB]} \quad (13.4)$$

where

$L_{Ws,inst,i}$ is the installed structure-borne sound power level of the source at supporting element i , in decibels;

$D_{sa,i}$ is the adjustment term from structure-borne to airborne excitation for supporting building element i , in decibels;

$R_{ij,ref}$ is the flanking sound reduction index for transmission from element i in the source room to element j in the receiving room, with reference to the area $S_{ref} = 10 \text{ m}^2$, in decibels;

S_i is the area of the supporting building element i in the source room, in square metres;

A_{ref} is the reference equivalent absorption area, in square metres, $A_{ref} = 10 \text{ m}^2$.

- 12354 parte 6 “Assorbimento acustico in ambienti chiusi”.

La norma riporta un modello di calcolo per valutare l'area totale l'assorbimento equivalente degli ambienti chiusi e il tempo di riverberazione. Il modello può essere applicato solo al calcolo in frequenza ed non è adatto ad ambienti di grande dimensioni con forme non regolari quali teatri o sale da concerto.

Modello di Calcolo

Nel modello si presume che il campo sonoro sia diffuso questo sta a significare che le dimensioni geometriche dell'ambiente siano simili e che l'assorbimento sia distribuito nello spazio.

Dati di ingresso richiesti

L'area di assorbimento equivalente e il tempo di riverberazione possono essere determinati

da:

- coefficiente di assorbimento di una superficie i: $\alpha_{s,i}$;
- area della superficie i: S_i ;
- area di assorbimento equivalente dell'elemento j: $A_{obj,j}$;
- coefficiente di assorbimento dell'insieme di elementi k: $\alpha_{s,k}$;
- area della superficie coperta dall'insieme di elementi k: S_k ;
- volume di un ambiente vuoto chiuso: V ;
- volume dell'elemento j o dell'insieme di elementi k: $V_{obj,j}$, $V_{obj,k}$.

Le equazioni principali richiamate nel modello sono le seguenti:

- Determinazione dell'area totale di assorbimento equivalente

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_{s,i} S_i + \sum_{j=1}^o A_{obj,j} + \sum_{k=1}^p \alpha_{s,k} S_k + A_{air} \quad [m^2] \quad (14)$$

dove:

- n è il numero di superfici i;
- o è il numero di elementi j;
- p è il numero di insiemi di elementi k.

L'area totale di assorbimento equivalente per l'assorbimento in aria deriva da:

$$A_{air} = 4 m V (1 - \Psi)$$

dove:

- m è il coefficiente di attenuazione della potenza in aria, in Neper per metro;
- V è il volume dell'ambiente vuoto chiuso, in metri cubi;
- Ψ è la parte di un elemento.

La parte di elemento dipende da:

$$\Psi = \frac{\sum_{j=1}^o V_{obj,j} + \sum_{k=1}^p V_{obj,k}}{V}$$

- Determinazione del tempo di riverberazione

Il tempo di riverberazione è determinato dall'area di assorbimento equivalente, calcolata secondo le equazioni precedenti, dal volume dell'ambiente vuoto chiuso e dalla parte di elementi:

$$T = \frac{55,3V}{c_o} \frac{(1 - \Psi)}{A} \quad [s] \quad (14.1)$$

dove:

c_o è la velocità del suono in aria, in metri al secondo.

(Perché il rapporto $55,3/c_o$ sia 0,16 come indicato nella EN ISO 140-4 si deve presumere una velocità del suono pari a 345,6 m/s).

Limiti

Il modello di calcolo dell'area di assorbimento equivalente è per definizione indipendente dal tipo di ambiente chiuso, sebbene la relazione con i livelli di pressione sonora risultanti dipenda dal tipo e dalla forma di ambiente chiuso.

Il modello di calcolo per il tempo di riverberazione è limitato agli ambienti chiusi con:

- volumi di forma regolare: nessuna dimensione dovrebbe avere una grandezza maggiore di 5 volte qualsiasi altra dimensione;
- assorbimento distribuito uniformemente: il coefficiente di assorbimento non dovrebbe variare di più di un fattore di 3 tra coppie di superfici opposte, a meno che siano presenti elementi di dispersione sonora;
- non troppi elementi: la parte di elementi dovrebbe essere minore di 0,2.

Se queste ipotesi non sono soddisfatte, il tempo di riverberazione spesso può risultare più lungo della stima. L'appendice D fornisce indicazioni sulle modalità di determinazione del tempo di riverberazione in queste situazioni.

2.2.1.2 Norma UNI TR 11175

La UNI TR 11175 rappresenta il recepimento e l'adattamento alla tipologia costruttiva nazionale delle norme della serie UNI EN 12354. In essa sono riportati tutta una serie di dati su prove svolte in laboratorio su sistemi costruttivi per le pareti e per i solai, per le finestre e infine accorgimenti e valutazioni per i piccoli elementi. Tramite la sua applicazione è possibile valutare in modo previsionale le prestazioni acustiche passive degli edifici calcolando gli indici di prestazione. La norma, con la quale si applica solo il modello semplificato, consente di calcolare tre tipologie di indici, più precisamente:

$R'w$ indice di valutazione del potere fonoisolante apparente;

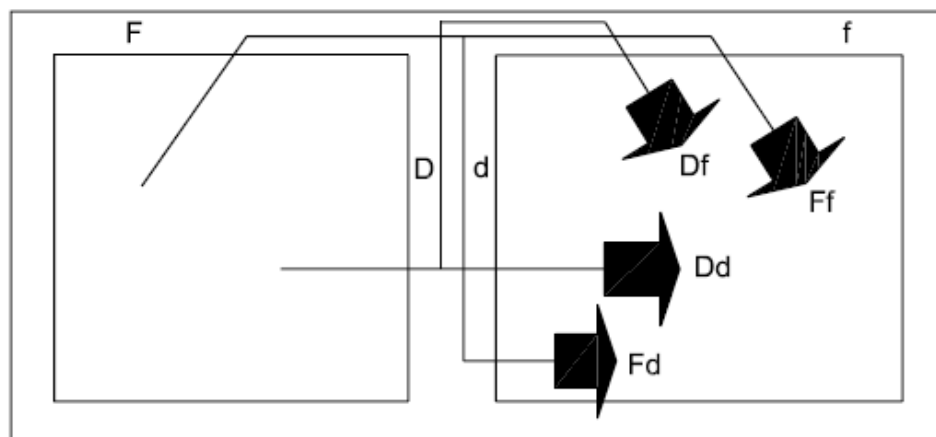
$D2m,nT,w$ indice di valutazione dell'isolamento acustico normalizzato di facciata rispetto al tempo di riverberazione;

$L'nT,w$ indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio

Nella norma niente si dice sulla previsione del rumore derivante dagli impianti in dotazione all'edificio analizzato (a tal proposito si osserva che la UNI TR 11175 è stata pubblicata dall'UNI nel 2005 mentre la parte 5 delle norme UNI EN 12354 risale al 2009).

CALCOLO SEMPLIFICATO DELLE PRESTAZIONI ACUSTICHE DEGLI EDIFICI BASATO SUGLI INDICI DI VALUTAZIONE

Percorsi delle trasmissioni diretta e laterale di rumori aerei



Principali equazioni richiamate

Indice di valutazione del potere fonoisolante apparente, R'_w , dell'elemento di separazione.

$$R'_w = -10 \log \left(10^{-\frac{R_{Dd,w}}{10}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{-\frac{R_{Ff,w}}{10}} + \sum_{f=1}^n 10^{-\frac{R_{Df,w}}{10}} + \sum_{F=1}^n 10^{-\frac{R_{Fd,w}}{10}} \right) [dB] \quad (15a)$$

Indice di valutazione dell'isolamento acustico di facciata normalizzato rispetto al tempo di riverberazione

$$D_{2m,nT,w} = R'_w + \Delta L_{fs} + 10 \log \frac{V}{6T_0S} [dB] \quad (15b)$$

Indice di valutazione del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato rispetto al tempo di riverberazione

$$L'_{n,w} = L_{n,w,eq} - \Delta L_w + K [db] \quad (15c)$$

2.2.1.3 Norma UNI 11367

La norma definisce le procedure di verifica e valutazione in opera dei requisiti acustici passivi. Oltre a questo riporta una metodologia per eseguire la classificazione acustica degli edifici. Si riporta qui di seguito il prospetto della norma con i valori dei parametri prestazionali che sono utilizzati dalla norma per la classificazione acustica delle unità immobiliari.

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

Oltre a questa tabella la norma riporta un altro prospetto con indicati valori di riferimento di ulteriori parametri da utilizzare per le strutture a destinazione ricettiva.

Classe	Indici di valutazione	
	g) Descrittore dell'isolamento acustico normalizzato di partizioni verticali e orizzontali fra ambienti della stessa unità immobiliare $D_{nT,w}$ dB	g) Descrittore del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato fra ambienti della stessa unità immobiliare L'_{nw} dB
I	≥ 56	≤ 53
II	≥ 53	≤ 58
III	≥ 50	≤ 63
IV	≥ 45	≤ 68

Al suo interno sono riportati diversi criteri per procedere con la classificazione e più precisamente:

- Classificazione acustica per requisito.
- Classificazione acustica per unità immobiliare.

I prospetti con i valori di riferimento e alcuni dei metodi richiamati nella norma, potrebbero essere usati per eseguire in via previsionale la classificazione acustica in fase progettuale degli edifici.

2.2.1.4 Norma UNI 11444

La norma, che si applica alla classificazione acustica delle unità immobiliari, richiama al suo interno un metodo di campionamento per le tipologie costruttive con elementi non seriali.

2.2.1.5 Norme UNI EN ISO 717

La serie di norme tratta la "Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio" sia per quanto riguarda i rumori aerei sia da calpestio. Con le stesse è possibile ricavare dallo spettro in frequenza dei diversi parametri, gli indici di valutazione a singolo numero, valori necessari per la verifica legislativa.

2.2.1.6 Norme UNI EN ISO 10140

Questa serie di norme tratta la "Valutazione dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio" in articolare nelle diverse parti sono descritte le diverse procedure di prova da seguire in laboratorio per misurare la prestanza dei componenti edilizi sia ai rumori aerei sia da calpestio. Altra cosa importante, riportata nella serie, sono le

caratteristiche che strumenti e camere di prova devono soddisfare per eseguire test validi che consentano di ottenere dati utilizzabili nei modelli previsionali.

2.2.2 Efficienza Energetica degli edifici

In campo energetico la ricerca si è concentrata sulle principali pubblicazioni scientifiche e sui principali riferimenti normativi. Nello specifico si è analizzata la norma UNI EN ISO 13790 del 2008 come norma europea e il suo recepimento nazionale rappresentato dalle norme della serie UNI TS 11300. Oltre a questo si sono analizzate numerose pubblicazioni scientifiche internazionali di cui tutti i titoli si sono riportati in bibliografia, mentre qui di seguito sono riportate le parti principali sia delle norme che delle pubblicazioni più utilizzate nella presente ricerca.

2.2.2.1 Norma UNI EN ISO 13790

La norma europea UNI EN ISO 13790 contiene al suo interno numerose indicazioni sulle differenti procedure di calcolo che è possibile seguire per valutare l'efficienza energetica degli edifici e degli impianti a essi connessi. La stessa riporta al suo interno numerosi richiami e rimandi ad ulteriori norme specifiche per le singole valutazioni (ad esempio per le dispersioni i fa rimando alla ISO 13789). La norma è articolata nel seguente modo:

- Descrizione dei procedimenti di calcolo
- Definizione dei confini e delle zone
- Fabbisogno di energia termica dell'edificio per il riscaldamento e il raffrescamento ambiente
- Scambio termico per trasmissione
- Scambio termico per ventilazione
- Apporti termici interni
- Apporti termici solari
- Parametri dinamici
- Condizioni interne
- Fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento ambiente

Si riporta qui di seguito una tabella in cui sono riportate le tipologie di valutazioni alle quali si può applicare la norma

2.2.2.2 Norme della serie UNI TS 11300 (recepimento nazionale UNI EN ISO

Tipo di valutazione	Dati di ingresso			Scopo della valutazione
	Uso	Clima	Edificio	
Di Progetto (Design rating)	Standard	Standard	Progetto	Permesso di costruire Certificazione o Qualificazione energetica del progetto
Standard (Asset rating)	Standard	Standard	Reale	Certificazione o Qualificazione energetica
Adattata all'utenza (Tailored rating)	In funzione dello scopo Reale			Ottimizzazione, Validazione, Diagnosi e programmazione di interventi di riqualificazione

13790)

Le norme della serie UNI TS 11300 rappresentano il recepimento nazionale della norma UNI EN ISO 13790. Queste sono articolate in quattro parti e sono norme il la cui applicazione è obbligatoria per legge. Le stesse risultano così suddivise:

- Parte prima: tratta il calcolo del fabbisogno di energia ideale per la climatizzazione estiva e per la climatizzazione invernale. Al sono richiamate per i calcoli numerose norme UNI, EN e ISO, si riportano più avanti le principali. All'interno della parte prima sono definite le diverse grandezze necessarie per eseguire la valutazione del fabbisogno di energia ideale dell'involucro edilizio. Le principali sono:

$$Q_{H,nd} = (Q_{H,tr} + Q_{H,ve}) - \eta_{H,gn}(Q_{int} + Q_{sol}) \quad (16a)$$

Dove:

- $Q_{H,nd}$ è il fabbisogno ideale di energia termica dell'edificio per riscaldamento;
- $Q_{H,tr}$ è lo scambio termico per trasmissione nel caso di riscaldamento;
- $Q_{H,ve}$ è lo scambio termico per ventilazione nel caso di riscaldamento;
- $\eta_{H,gn}$ è il fattore di utilizzazione degli apporti termici;
- Q_{int} sono gli apporti termici interni;
- Q_{sol} sono gli apporti termici solari;

$$Q_{C,nd} = (Q_{int} + Q_{sol}) - \eta_{C,gn}(Q_{C,tr} + Q_{C,ve}) \quad (16b)$$

Dove:

- $Q_{C,nd}$ è il fabbisogno ideale di energia termica dell'edificio per raffrescamento;
- $Q_{C,tr}$ è lo scambio termico per trasmissione nel caso di raffrescamento;
- $Q_{C,ve}$ è lo scambio termico per ventilazione nel caso di raffrescamento;
- $\eta_{C,ls}$ è il fattore di utilizzazione delle dispersioni termiche;
- Q_{int} sono gli apporti termici interni;

Q_{sol} sono gli apporti termici solari;

$$Q_{H,tr} = H_{tr,adj}(\theta_{int,set,H} - \theta_e)t \quad Q_{C,tr} = H_{tr,adj}(\theta_{int,set,C} - \theta_e)t \quad (16c)$$

Dove:

$H_{tr,adj}$ è il coefficiente globale di scambio termico per trasmissione della zona considerata, corretto per tenere conto della differenza di temperatura interno-esterno [W/K];

$\theta_{int,set}$ è la temperatura interna di regolazione per il riscaldamento o raffreddamento della zona considerata;

θ_e è la temperatura media mensile dell'ambiente esterno;

t è la durata del mese considerato espressa in ore.

Il coefficiente globale di scambio termico $H_{tr,adj}$ è calcolato secondo la seguente equazione:

$$H_{tr,adj} = H_D + H_g + H_U + H_A \quad (16d)$$

H_D è il coefficiente di scambio termico diretto per trasmissione verso l'ambiente esterno;

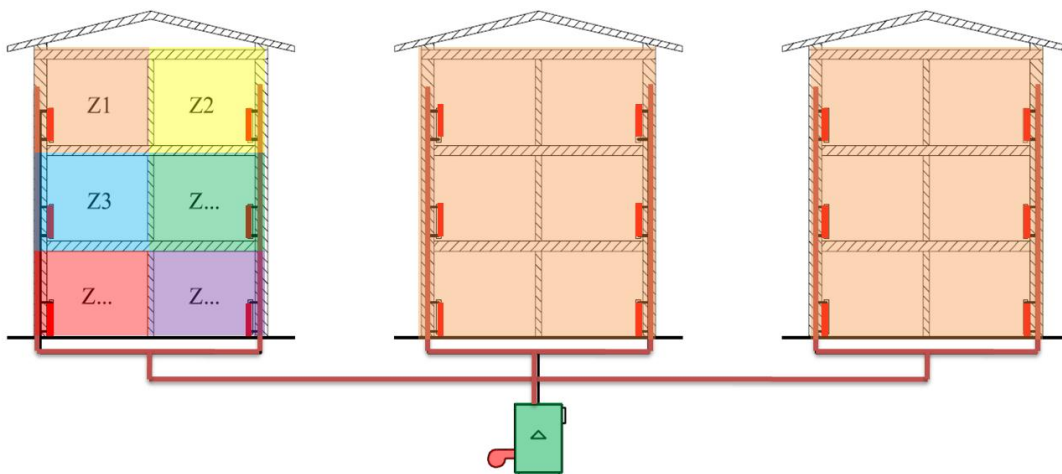
H_g è il coefficiente di scambio termico stazionario per trasmissione verso il terreno;

H_U è il coefficiente di scambio termico per trasmissione attraverso gli ambienti non climatizzati;

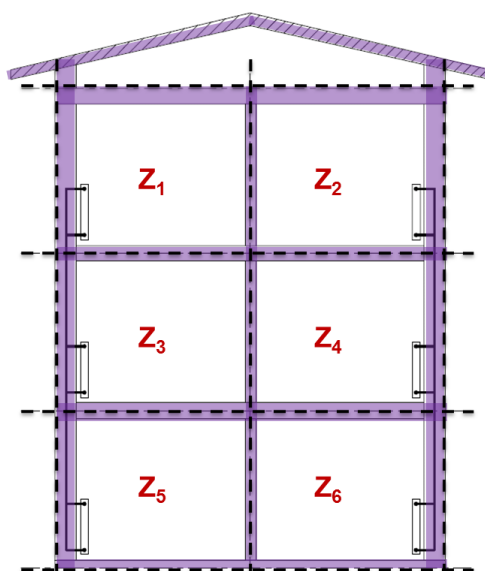
H_A è il coefficiente di scambio termico per trasmissione verso altre zone (interne o meno all'edificio) climatizzate a temperatura diversa;

Per il calcolo dei diversi termini dell'equazione 16d si fa rimando a diverse procedure di calcolo secondo le norme UNI EN ISO 13789, UNI EN ISO 13370, CEN/TR 14788, UNI EN 12792, UNI 10339, UNI EN ISO 6946 e UNI TS 11300-P1, delle quali si riportano più avanti nella presente le equazioni principali di riferimento.

La parte prima della UNI TS 11300 riporta inoltre tutta una serie di regole da osservare nella delimitazione delle zone termiche e nella considerazione dei volumi corrispondenti. Questo vale sia per le zone termiche riscaldate e non riscaldate. Di seguito si riportano alcuni schemi di riferimento.



Zone termiche aventi proprie caratteristiche di dispersione ed esposizione



Regole geometriche per la suddivisione dei volumi

2.2.2.3 Norma UNI EN ISO 6946 - Componenti ed elementi per edilizia Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo

La presente norma è stata analizzata in quanto al suo interno è riportato il metodo unificato per il calcolo della trasmittanza dei componenti edilizi. La norma calcola la trasmittanza come l'inverso della resistenza termica totale. Al suo interno sono inoltre presenti equazioni per il calcolo delle componenti delle resistenze liminari. Si riportano qui di seguito la tabella con i differenti valori delle resistenze liminari in funzione della direzione del flusso termico e degli ambienti che rappresentano le condizioni al contorno.

Conventional surface resistances

Surface resistance $m^2 \times K/W$	Direction of heat flow		
	upwards	horizontal	downwards
R_{si}	0,10	0,13	0,17
R_{se}	0,04	0,04	0,04

Note 1 The values given are design values. For the purposes of declaration of the thermal transmittance of components and other cases where values independent of heat flow direction are required, or when the heat flow direction is liable to vary, it is advisable that the values for horizontal heat flow be used.

Note 2 The surface resistances apply to surfaces in contact with air. No surface resistance applies to surfaces in contact with another material.

La norma riporta inoltre metodi di calcolo per componenti non omogenei e non regolari come quelli a sezione variabile.

2.2.2.4 Norma UNI EN 13788 - Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità - superficiale critica e condensazione interstiziale - Metodo di calcolo

La presente norma è stata analizzata in quanto al suo interno sono richiamate tutta una serie di procedure di calcolo per eseguire la verifica di non formazione di condensa o di rievaporazione della stessa nel caso di formazione di questa. La norma definisce inoltre tutta una serie di fattori, di cui tener conto in fase di progettazione, per evitare la formazione di condensa superficiale in differenti ambienti con diverse destinazioni d'uso e in presenza di carichi di vapore interni.

$$f_{R_{si},min} = \frac{\theta_{si,min} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}$$

L'equazione del $f_{R_{si},min}$ su riportata rappresenta il fattore limite da confrontare con il fattore calcolato $f_{R_{si}}$ per evitare fenomeni di condensa superficiale. La norma riporta inoltre in appendice ulteriori norme di riferimento a livello nazionale riportanti i dati climatici e le condizioni iniziali da utilizzare nei calcoli.

2.2.2.5 Norma UNI EN ISO 13786 - Caratteristiche termiche dinamiche - Metodi di calcolo

La norma è stata analizzata in quanto riporta al suo interno una procedura per calcolare i parametri dinamici dei sistemi costruttivi. Al suo interno sono definite diverse grandezze

e fra le quali la trasmittanza termica periodica Y_{12} . Il modulo di tale trasmittanza Y_{ie} è il valore numerico da confrontare con i limiti massimi imposti per legge dal DPR 59/09 per i nuovi componenti edilizi o per quelli ristrutturati. All'interno della norma sono definiti:

- profondità di penetrazione periodica

$$\delta = \sqrt{\frac{\lambda T}{\pi \rho c}}$$

- Il rapporto tra lo spessore dello strato e la profondità di penetrazione

$$\xi = \frac{d}{\delta}$$

- Matrice di trasferimento di calore di uno strato omogeneo

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} \hat{\theta}_2 \\ \hat{q}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \hat{\theta}_1 \\ \hat{q}_1 \end{pmatrix}$$

- Elementi complessi della matrice

$$Z_{11} = Z_{22} = \cosh(\xi) \cos(\xi) + j \sinh(\xi) \sin(\xi);$$

$$Z_{12} = -\frac{\delta}{2\lambda} \left\{ \sinh(\xi) \cos(\xi) + \cosh(\xi) \sin(\xi) + j \left[\cosh(\xi) \sin(\xi) - \sinh(\xi) \cos(\xi) \right] \right\}$$

$$Z_{21} = -\frac{\lambda}{\delta} \left\{ \sinh(\xi) \cos(\xi) - \cosh(\xi) \sin(\xi) + j \left[\sinh(\xi) \cos(\xi) + \cosh(\xi) \sin(\xi) \right] \right\}.$$

- Matrice di trasferimento del calore di un componente edilizio

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} = \mathbf{Z}_N \mathbf{Z}_{N-1} \dots \mathbf{Z}_3 \mathbf{Z}_2 \mathbf{Z}_1$$

Tale norma è stata interamente implementata nel codice di calcolo.

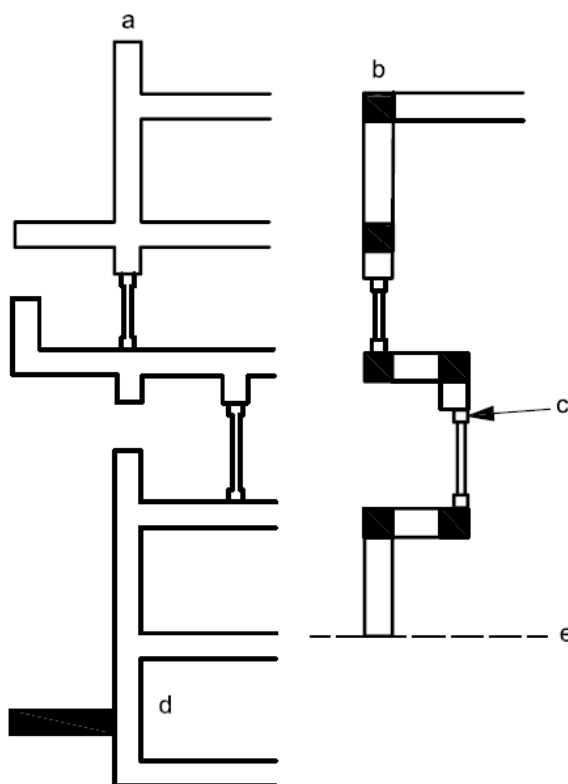
2.2.2.6 Norma UNI EN ISO 13789 - Coefficienti di trasferimento del calore per trasmissione e ventilazione - Metodo di calcolo

La presente norma riporta il metodo, obbligatorio secondo la legislazione vigente, per determinare il coefficiente globale di scambio termico per trasmissione. Tale norma si applica a tutti gli elementi costruttivi fuori terra. Si riportano qui di seguito le principali equazioni presenti nella norma e gli schemi con le semplificazioni a adottare per il calcolo.

Coefficiente globale di scambio termico per trasmissione

$$H_D = \sum_i A_i U_i + \sum_k l_k \Psi_k + \sum_j \chi_j$$

Questa equazione si può applicare sia alla superficie interne che esterna dell'involucro edilizio. Ovviamente scegliendo l'una o l'altra superficie bisogna fare delle opportune considerazioni. ad esempio, il primo termine dell'equazione su riportata, è maggiore quando si usano le dimensioni esterne di quando si usa dimensioni interne. Di conseguenza, i valori di Ψ_k sono generalmente più piccoli per dimensioni esterne, e possono anche essere negativi, in alcuni casi, come gli angoli esterni.



La figura illustra la differenza fra la sezione reale (a) e la sezione usata per il calcolo (b), come si può notare tutte le intersezioni fra i differenti componenti rappresentano dei ponti termici. Inoltre nello schema di modello per il calcolo la linea evidenziata con la lettera (e) rappresenta il limite di applicabilità della presente norma.

2.2.2.7 Norma UNI EN ISO 13370 - Prestazione termica degli edifici Trasferimento di calore attraverso il terreno - Metodi di calcolo

La norma riporta delle procedure per valutare lo scambio termico che avviene attraverso i componenti edilizi a contatto o confinanti con il terreno. All'interno sono riportate procedure per il calcolo in regime stazionario e in regime dinamico, con modelli tridimensionali, bidimensionali e monodimensionali. I periodi di variazione considerati per il calcolo dinamico sono su base mensile, la norma non si applica a periodi temporali inferiori.

Si riporta qui di seguito una tabella riportata nella norma, riportante le principali caratteristiche termofisiche dei differenti tipi di terreno.

Conducibilità termica del terreno

Tipo di terreno	Densità a secco ρ kg/m ³	Contenuto di umidità u kg/kg	Grado di saturazione %	Conducibilità termica λ W/(m · K)	Valore rappresentativo di λ W/(m · K)
Limo	1 400 a 1 800	0,10 a 0,30	70 a 100	1,0 a 2,0	}
Argilla	1 200 a 1 600	0,20 a 0,40	80 a 100	0,9 a 1,4	
Torba	400 a 1 100	0,05 a 2,00	0 a 100	0,2 a 0,5	-
Sabbia secca	1 700 a 2 000	0,04 a 0,12	20 a 60	1,1 a 2,2	}
Sabbia umida	1 700 a 2 100	0,10 a 0,18	85 a 100	1,5 a 2,7	
Roccia	2 000 a 3 000	*)	*)	2,5 a 4,5	3,5

*) Generalmente molto piccolo (contenuto di umidità < 0,03 volte la massa), tranne che per rocce porose.

I casi richiamati nella seguente norma per il calcolo delle dispersioni sono i seguenti:

- Pavimento contro terra non isolato o uniformemente isolato
- Pavimento contro terra con isolamento perimetrale
- Pavimento su intercapedine
- Piano interrato riscaldato
- Piano interrato non riscaldato o parzialmente riscaldato

2.2.2.8 UNI EN ISO 7730 2006 - Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale

La presente norma è stata utilizzata in quanto consente la determinazione degli indicatori del comfort degli ambienti interni mediante l'utilizzo del PMV (voto medio previsto) e del PPD (percentuale prevista di insoddisfatti). All'interno della norma oltre a un metodo di calcolo per determinare i suddetti indicatori è riportata una procedura informatica che è possibile implementare su codice di calcolo per determinare tali descrittori. La norma definisce un ambiente in condizioni di comfort quando il PPD è inferiore al 10%. Si riportano qui di seguito, alcuni diagrammi ed equazioni presenti nella norma, che evidenziano la variazione del comfort locale nell'ambiente considerato.

La prima equazione che si riporta evidenzia il disagio dovuto alle correnti d'aria che possono essere presenti nell'ambiente considerato.

$$DR = (34 - t_{a,l})(\bar{v}_{a,l} - 0,05)^{0,62} (0,37 \times \bar{v}_{a,l} \times Tu + 3,14)$$

Per $\bar{v}_{a,l} < 0,05$ ms: si usi $\bar{v}_{a,l} = 0,05$ m/s

Per $DR > 100\%$: si usi $DR = 100\%$

dove:

$t_{a,l}$ è la temperatura locale dell'aria, in gradi Celsius, compresa tra 20 °C e 26 °C;

$\bar{v}_{a,l}$ è la velocità media locale dell'aria, in metri al secondo, <0,5 m/s;

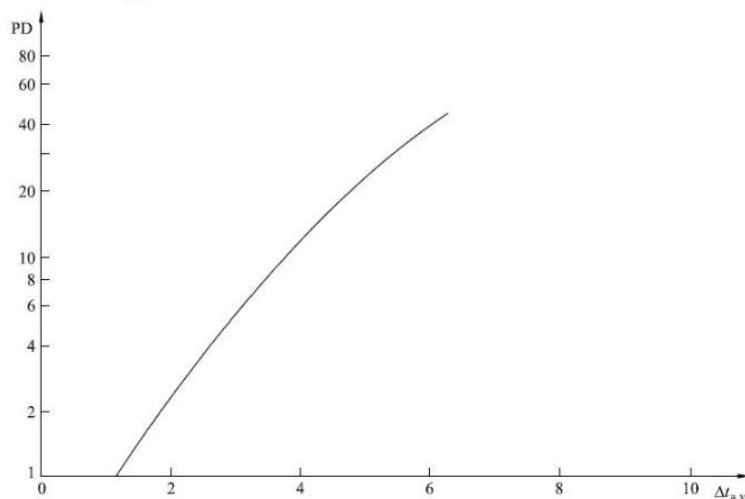
Tu è l'intensità locale di turbolenza, in percentuale, compresa tra il 10% ed il 60% (se incognita, può essere posta pari al 40%).

figura 2 Disagio locale dovuto a differenza verticale di temperatura dell'aria

Legenda

PD Percentuale di insoddisfatti, %

$\Delta t_{a,v}$ Differenza verticale di temperatura dell'aria tra testa e piedi, °C



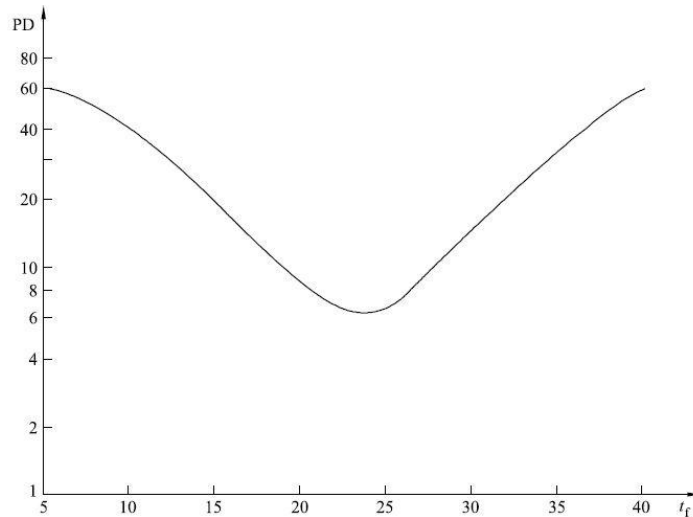
Il diagramma rappresenta la variazione del PPD in funzione della differenza di temperatura fra testa e piedi. Dallo stesso si evince che il 10% di insoddisfatti è raggiunto quando il delta T è maggiore di tre gradi centigradi (tale diagramma ripota la differenza di temperatura valida per le sole scale centigrade “Celsius” e “Kelvin”).

figura 3 Disagio termico locale dovuto a pavimenti caldi o freddi

Legenda

PD Percentuale di insoddisfatti, %

t_f Temperatura del pavimento, °C



Questo diagramma riportato nella norma evidenzia la percentuale di insoddisfatti dovuti alla temperatura dei pavimenti. Se questi infatti, si presentano troppo freddi o troppo caldi rispetto ad una temperatura ritenuta ideale, ricavata a seguito di studi svolti su persone in piedi e sedentarie.

figura 4 Disagio termico locale dovuto ad asimmetria della temperatura radiante

Legenda

PD Percentuale di insoddisfatti, %

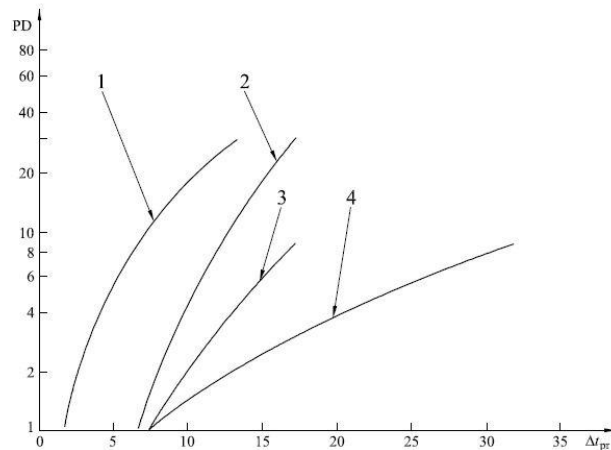
Δt_{pr} Asimmetria della temperatura radiante, °C

1 Soffitto caldo

2 Parete fredda

3 Soffitto freddo

4 Parete calda



Questo diagramma riporta le differenti curve di variazione della percentuale di insoddisfatti dovuta alle differenti asimmetrie radianti. Nella norma sono riportate le differenti equazioni da utilizzare per il calcolo dei differenti parametri e che sono qui di seguito riportate.

a) Soffitto caldo

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(2,84 - 0,174 \times \Delta t_{pr})} - 5,5$$

$$\Delta t_{pr} < 23 \text{ }^\circ\text{C}$$

b) Parete fredda

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(6,61 - 0,345 \times \Delta t_{pr})}$$

$$\Delta t_{pr} < 15 \text{ }^\circ\text{C}$$

c) Soffitto freddo

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(9,93 - 0,50 \times \Delta t_{pr})}$$

$$\Delta t_{pr} < 15 \text{ }^\circ\text{C}$$

d) Parete calda

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(3,72 - 0,052 \times \Delta t_{pr})} - 3,5$$

$$\Delta t_{pr} < 35 \text{ }^\circ\text{C}$$

La presente norma è principalmente applicabile al regime permanente. Nella realtà il regime è spesso non permanente, di conseguenza è necessario valutare l'applicabilità della presente norma in funzione delle variazioni previste all'interno dell'ambiente considerato. Secondo la norma le variazioni dovute ad un regime non permanente possono essere di tre tipi:

- cicliche;
- impulsi o gradini;
- transitori;

tali variazioni devono essere attentamente valutate caso per caso onde determinare corretti valori di PPD.

2.2.2.9 Legislazione Europea di riferimento

- Direttiva 2010/31 CE
- Direttiva 2008/28 CE
- Direttiva 2002/91 CE del 16 dicembre 2002/ 210/31/CE

Rendimento Energetico nell'edilizia

- Direttiva 89/106/CE del 21 dicembre 1988

Ravvicinamento delle disposizioni legislative, regolamentari e amministrative degli Stati Membri concernenti i prodotti da costruzione

- Direttiva **92/42/CE** del 21 maggio 1992

Requisiti di rendimento per le nuove caldaie ad acqua calda alimentate con combustibili liquidi o gassosi

- Direttiva **92/175/CE** del 22 settembre 1992

Indicazione del consumo degli apparecchi domestici di energia e di altre risorse, tramite etichettatura e informazioni uniformi relative ai prodotti

- Direttiva **93/176/CE** del 13 settembre 1993

Intesa a limitare le emissioni di biossido di carbonio migliorando l'efficienza energetica (SAVE)

- Direttiva **2001/77/CE** del 27 settembre 2001

Promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità

- Proposta di Direttiva COM(2003) 739

L'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici

- Proposta di Direttiva COM(2001) 226

Riguardante il rendimento energetico degli edifici

- **Libro Verde** del 8 marzo 2006

Una strategia europea per un'energia sostenibile, competitiva e sicura

- Libro Verde sull'efficienza energetica, giugno 2005

Fare più con meno

- Libro Bianco

Energia per il futuro: le fonti energetiche rinnovabili

2.2.2.10 Legislazione Italiana di riferimento

- **Legge D. 10** del 9 gennaio 1991

Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia.

- **D.P.R.D. 412** del 26 agosto 1993

Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10

- D.M. del 13 dicembre 1993

Approvazione dei modelli tipo per la compilazione della relazione tecnica di cui all'art. 28 della legge 9 gennaio 1991 n. 10, attestante la rispondenza alle prescrizioni in materia di contenimento del consumo energetico degli edifici.

- D.M. del 6 Agosto 1994

Recepimento delle norme UNI attuative del decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412, recante il regolamento per il contenimento dei consumi di energia degli impianti termici degli edifici, e rettifica del valore limite del fabbisogno energetico normalizzato

- Decreto 2 aprile 1998

Modalità di certificazione delle caratteristiche e delle prestazioni energetiche degli edifici e degli impianti ad essi connessi.

- **D.P.R. D. 551** del 21 dicembre 1999

Regolamento recante modifiche al decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412, in materia di progettazione, installazione, esercizio e manutenzione degli impianti termici degli edifici, ai fini del contenimento dei consumi di energia.

- Raccomandazione CTI 03/2003

Prestazioni energetiche degli edifici - Climatizzazione invernale e preparazione acqua calda per usi igienico - sanitari.

- D.Lgs 192 del 2005
- D.lgs. 311 del 2006
- D.P.R. 59 del 2009
- D.M. 26 giugno 2009
- D.Lgs. 28 del 2011

Le su elencate normative si applicano ai nuovi edifici, alle ristrutturazioni totali e parziali. Le stesse dettano parametri minimi e massimi da rispettare e impongono procedure di calcolo della prestazione energetica. Il D.lgs.192/05 riporta inoltre a chiare lettere che le prestazioni energetiche devono essere conseguite anche nel rispetto delle prestazioni acustiche passive di cui al DPCM 5/12/97.

2.2.3 Illuminazione naturale degli edifici

Le sorgenti naturali che influenzano le attività degli individui nell'interno dei fabbricati ed il loro benessere visivo, biologico e fisiologico sono generalmente il cielo e il sole.

Evidentemente il flusso luminoso varia in funzione della posizione del sole e della presenza o meno di nubi e ciò comporta che *la sua valutazione dev'essere effettuata in regime variabile*, con calcoli complessi da affrontare con l'ausilio di un opportuno modello di calcolo informatizzato che solitamente richiede esperienza e tempo per l'elaborazione dei dati.

Spesso è sufficiente effettuare i calcoli in regime stazionario, adottando opportune semplificazioni, nella presente ricerca, saranno presi in esame metodi che considerano costante il flusso emesso dalla sorgente. Per quanto riguarda la distribuzione della luminanza della volta celeste, verranno invece considerate due ipotesi:

1. *cielo a luminanza uniforme;*

Presuppone che il cielo si comporti come una sorgente estesa che emetta secondo la legge di Lambert, con radianza uniforme. Questa ipotesi semplifica notevolmente il problema e corrisponde ad una situazione di cielo parzialmente coperto, in inverno

quando il sole è basso sull'orizzonte. A tale riguardo normalmente viene attribuito al cielo un valore della luminanza pari a 1600 nit con un conseguente illuminamento medio esterno pari a 5000 lux.

2. cielo coperto internazionale.

Si riferisce ad una elaborazione di dati sperimentali di Moon e Spencer, dove la luminanza in un punto avente angolo di elevazione γ sull'orizzonte L_γ è legata alla luminanza allo zenith L_z dalla formula:

$$L_\gamma = \frac{L_z(1 + 2 \sin \gamma)}{3}$$

In questo caso la luminanza allo zenith è legata all'illuminamento orizzontale esterno (E_0) dalla formula:

$$L_z = \frac{9E_0}{7\pi}$$

Il fattore di luce diurna, chiamato anche *Daylight Factor (D)*, è il parametro ormai universalmente accettato per l'impostazione degli studi volti a garantire una illuminazione diurna ottimale. Il **fattore di luce diurna** è un parametro introdotto per valutare l'illuminazione naturale all'interno di un ambiente confinato. Esso è attualmente riconosciuto dalla normativa italiana in ambito di edilizia residenziale, scolastica ed ospedaliera ed è prioritario per garantire un'illuminazione diurna ottimale nei locali.

All'interno di un ambiente chiuso, l'illuminamento naturale nei diversi punti di uno spazio interno è costituito da tre componenti: l'apporto di luce proveniente dalle sorgenti primarie esterne (la volta celeste, il sole), l'apporto di luce dovuto alle riflessioni delle superfici di eventuali ostruzioni urbane esterne, l'apporto di luce dovuto alle riflessioni multiple che si verificano all'interno dell'ambiente. Nella valutazione delle condizioni di illuminazione naturale interna si considera il caso più sfavorevole che si verifica in assenza di radiazione solare diretta, caratterizzata invece da una forte direzionalità in funzione della posizione del sole. Posto il cielo coperto come condizione ottimale di valutazione, il rapporto tra

illuminamento interno ed esterno deve essere costante e non deve dipendere né dall'ora del giorno, né dal periodo dell'anno, né dall'orientamento del locale: si introduce quindi il fattore di luce diurna [FLD], grandezza sintetica e adimensionale espressa in percentuale, definita come il rapporto fra l'illuminamento misurato in un punto specifico dell'ambiente interno e l'illuminamento misurato all'esterno su una superficie orizzontale che vede l'intera volta celeste senza ostruzioni in condizioni di cielo coperto.

Per non limitare il calcolo su un unico punto viene utilizzato il **fattore medio di luce diurna** [FLDm], dove per medio si intende mediato su più punti di misura dell'ambiente interno in rapporto con l'esterno: in questo modo è possibile valutare meglio l'illuminazione globale nel locale confinato. I valori richiesti dalle normative possono variare in funzione delle varie destinazioni d'uso dei locali: vi sono tuttavia dei valori di soglia al di sotto dei quali non sono verificate le condizioni di illuminazione naturale sufficienti alle specifiche esigenze. Uno schema di valutazione indicativo può essere il seguente:

FLDm < 1% = insufficiente

1% < FLDm < 2% = discreto

2% < FLDm < 4% = buono

FLDm > 4% = ottimo

Limitarsi a considerare solo le superfici finestrate per i rapporti aeroilluminanti non soddisfa i requisiti igienico-sanitari nei locali: rispettare il fattore medio di luce diurna significa distribuire correttamente le finestre e valutarne la capacità di garantire condizioni di illuminazione naturale confortevoli nell'ambiente confinato.

Per calcolare il coefficiente di illuminazione diurna è necessario conoscere sia l'illuminamento interno desiderato, sia l'illuminamento esterno.

Il flusso luminoso che cade sul piano di lavoro di una stanza arriva:

- in parte direttamente dalla finestra (o dalle finestre);

è, a sua volta:

- in parte da considerare diretto dal cielo;
 - in parte riflesso da oggetti esterni alla finestra, per esempio edifici.
- in parte dalle riflessioni del soffitto, delle pareti e del pavimento.

Il coefficiente di illuminazione diurna è quindi scomponibile nella somma di tre componenti:

- componente cielo;
- componente di riflessione esterna;
- componente di riflessione interna.

La componente cielo (sky component) D_s indica la quantità di luce, espressa in percento, che dal cielo, considerato di luminanza costante, o di tipo *coperto internazionale*, arriva direttamente nel punto preso di riferimento.

La componente di riflessione esterna (externally reflected component) D_e indica la quantità di luce che arriva dal punto di riferimento dopo aver subito riflessioni causate da superfici esterne, quali alberi, costruzioni vicine, ecc.

La componente di riflessione interna (internally reflected component) D_i è la quantità di luce che arriva dal punto di riferimento dopo aver subito riflessioni causate da superfici interne, quali il pavimento, le pareti, il soffitto, ecc.

Se la somma $D = D_s + D_e + D_i$ di questi tre fattori uguaglia o supera il valore ottimale del 4%, potrà considerarsi che l'ambiente preso in considerazione gode di una ottima illuminazione naturale; in ogni caso dovranno essere rispettati i valori minimi riportati nella seguente tabella.

Ambienti	D (%) non minore di	Raccomandazioni
cucine	2	su almeno il 50% dell'area del pavimento (minimo 4,50 m ²)
soggiorni	1	su almeno il 50% dell'area del pavimento (minimo 7 m ²)
stanze da letto	0,5	su almeno il 75% dell'area del pavimento (minimo 5,50 m ²)
scuole	2	in tutte le aule e nelle cucine
ospedali	1	nelle camere di degenza
sale da disegno	6	sui tavoli da disegno
copisterie	2	sul resto dell'area
officine	4	su tutta l'area di lavoro
industrie	3÷6	secondo se prevale l'illuminazione laterale o dall'alto
edifici pubblici	5	
uffici	1	con illuminazione laterale a 3,6 m dalla finestra
	2	con illuminazione dall'alto su tutta l'area

2.2.3.1 Leggi e decreti di riferimento

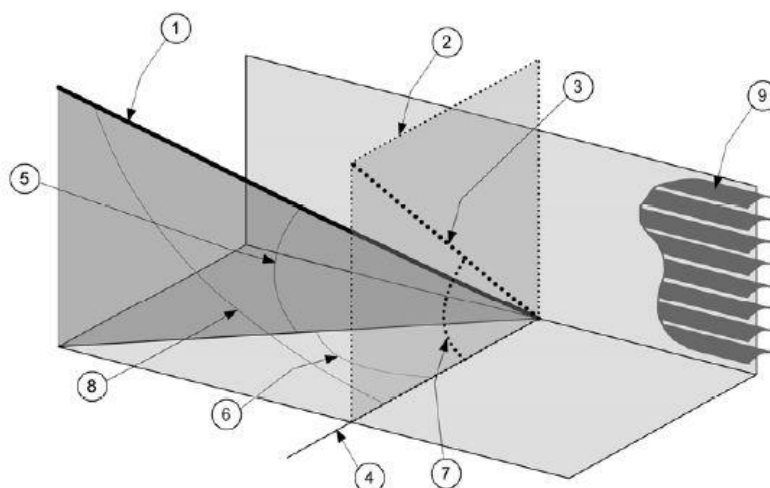
Si riporta l'elenco delle principali leggi e dei principali decreti che a livello nazionale trattano il fattore di luce diurna e ne impongono l'obbligo di rispetto per alcune categorie di edifici.

- Decreto del Presidente della Repubblica n° 303 del 19/3/56, "Norme generali per l'igiene del lavoro", G.U. n°105 del 30/4/56.
- Circolare del Ministero del Lavori Pubblici del 22/5/67 n° 3151, "Criteri di valutazione delle grandezze atte a rappresentare le proprietà termiche, igrometriche, di ventilazione e di illuminazione nelle costruzioni edilizie", relativa all'edilizia civile sovvenzionata.
- Circolare del Ministero del Lavori Pubblici del 22/12/74 n° 13011, dal titolo "Requisiti fisico-tecnici per le costruzioni edilizie ospedaliere. Proprietà tecniche, igrometriche, di ventilazione e di illuminazione".
- Decreto Ministeriale del 5/7/75 dal titolo "Modificazioni alle istituzioni Ministeriali del 20/6/1896 relative all'altezza minima dei locali ed ai requisiti igienico-sanitari principali dei locali di abitazione", G.U. n° 190 del 18/7/75.
- Decreto Ministeriale del 18/12/75 dal titolo "Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici minimi di funzionalità didattica, edilizia e urbanistica da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica", G.U. n° 29 del 2/2/76.

2.2.3.2 UNI EN 14500 2008 - Tende e chiusure oscuranti - Benessere termico e visivo - Metodi di prova e di calcolo

La norma definisce le prove e i metodi di calcolo per classificare e definire le prestazioni ai fini del benessere termico e visivo. La stessa rappresenta il recepimento nazionale della norma EN 14500.

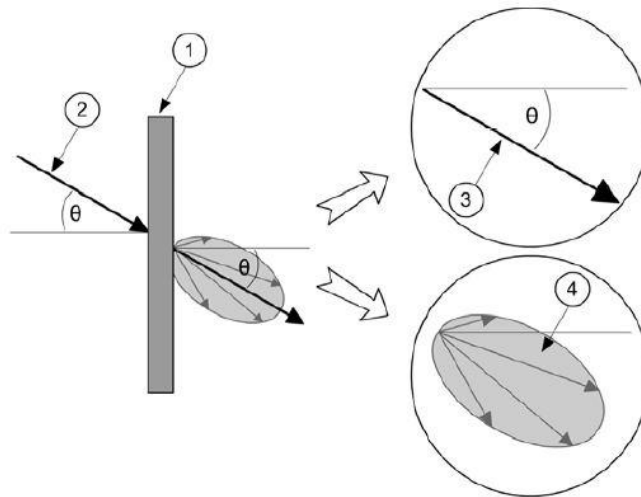
Nella norma sono definite ed illustrate tutte le grandezze fisiche necessarie per il calcolo delle grandezze in gioco. Si riportano qui di seguito due figure riportate nella norma che evidenziano le geometrie e direzioni da considerare nel modello e le differenti componenti della radiazione solare per quanto riguarda gli effetti luminosi e termici.



Key

- 1 Direction of the incident radiation
- 2 Vertical plane normal to the solar protection device
- 3 Projected direction of the incident radiation
- 4 Direction normal to the solar protection device
- 5 Altitude angle (angle in the vertical plane)
- 6 Azimuth angle (angle in the horizontal plane)
- 7 Profile angle
- 8 Angle of incidence
- 9 Solar protection device

Figure 1 – Angle definitions



Key

- 1 Solar protection device
- 2 Incident directional light or solar radiation
- 3 Transmitted direct component of light or solar radiation
- 4 Transmitted diffuse component of light or solar radiation

Figure 2 — Direct and diffuse components of transmitted radiation

Nella norma si fa riferimento ai tipi di schermature che si riportano qui di seguito.

- Tende veneziane
- Tende a rullo
- Tende plissé
- Tende da sole
- Tende verticali
- Tapparelle

Il metodo d'approccio, nel caso del calcolo previsionale in sede di progettazione, è riportato nell'Annex D.

2.2.3.3 UNI EN 15251 Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica

All'interno della presente norma sono definiti i parametri, per descrivere l'ambiente interno, che influiscono sul rendimento energetico. La norma è applicabile ad edifici residenziali (singoli o plurifamiliari), uffici, alberghi, ristoranti, scuole, edifici commerciali ed impianti sportivi. La stessa considera le interazioni causate essenzialmente dalla

presenza di persone negli ambienti in altre parole non è applicabile in tutti quei casi in cui il clima interno è modificato a causa del processo produttivo.

Si riporta qui di seguito un diagramma che evidenzia le interazioni della EN 15251 con le altre norme.

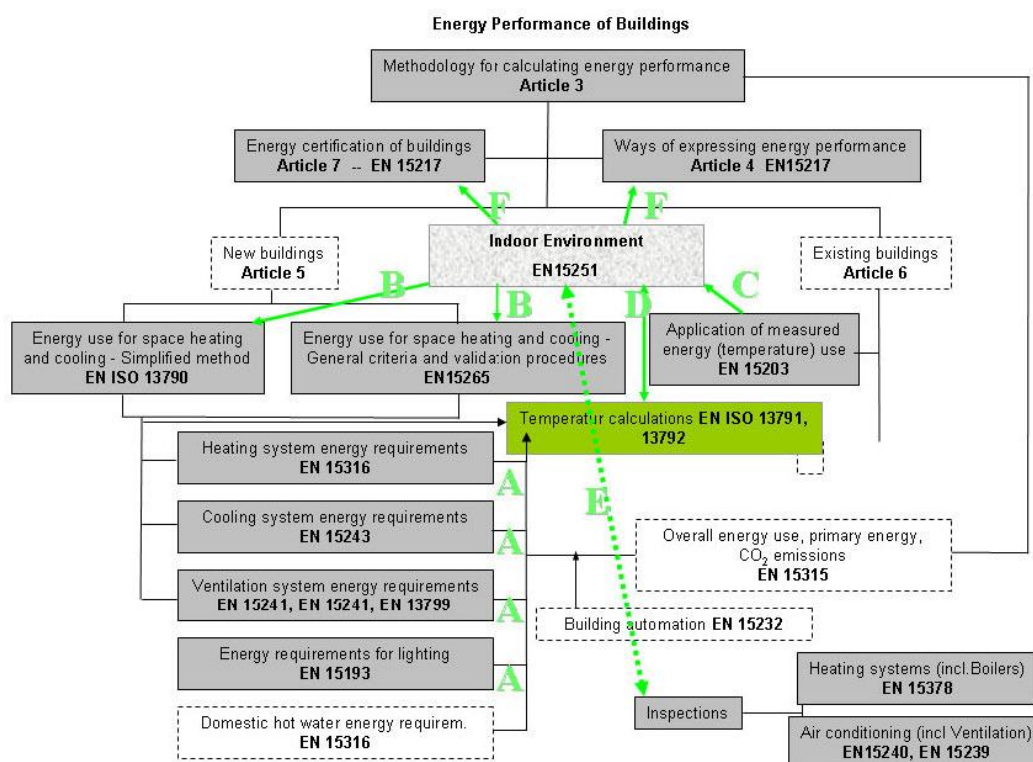


Figure 1 — Diagram showing the interaction with other standards related to the EPBD

All'interno della norma è inoltre richiamato un metodo per classificare gli ambienti in funzione del clima interno rispetto a differenti parametri considerati. Tale metodo è evidenziato nell'Annex I.

2.2.4 Principali Pubblicazioni scientifiche analizzate

Si riporta di seguito un riassunto sulle pubblicazioni scientifiche analizzate i cui argomenti sono stati utili, o usati come base di partenza per l'implementazione algoritmica di alcuni metodi e classi del modello di calcolo sviluppato.

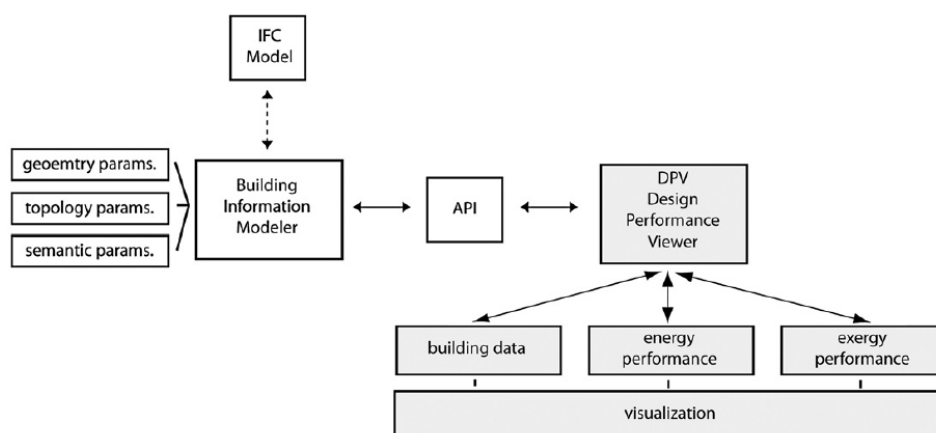
2.2.4.1 *Thermodynamic analysis of a building using exergy analysis method -*

Authors: Cem Tahsin Yucer, Arif Hepbasli - Accepted date: 18-10-2010

Questa pubblicazione è stata analizzata in quanto tratta l'analisi termodinamica di un edificio scolastico con il metodo del bilancio di energia ed exergia, valuta i flussi di energia ed exergia sia dell'involucro edilizio che degli impianti in fase di analisi e progettazione. Il metodi utilizzati all'interno di questa pubblicazione sono in gran parte affrontati all'interno dell'annex 37 [P7]

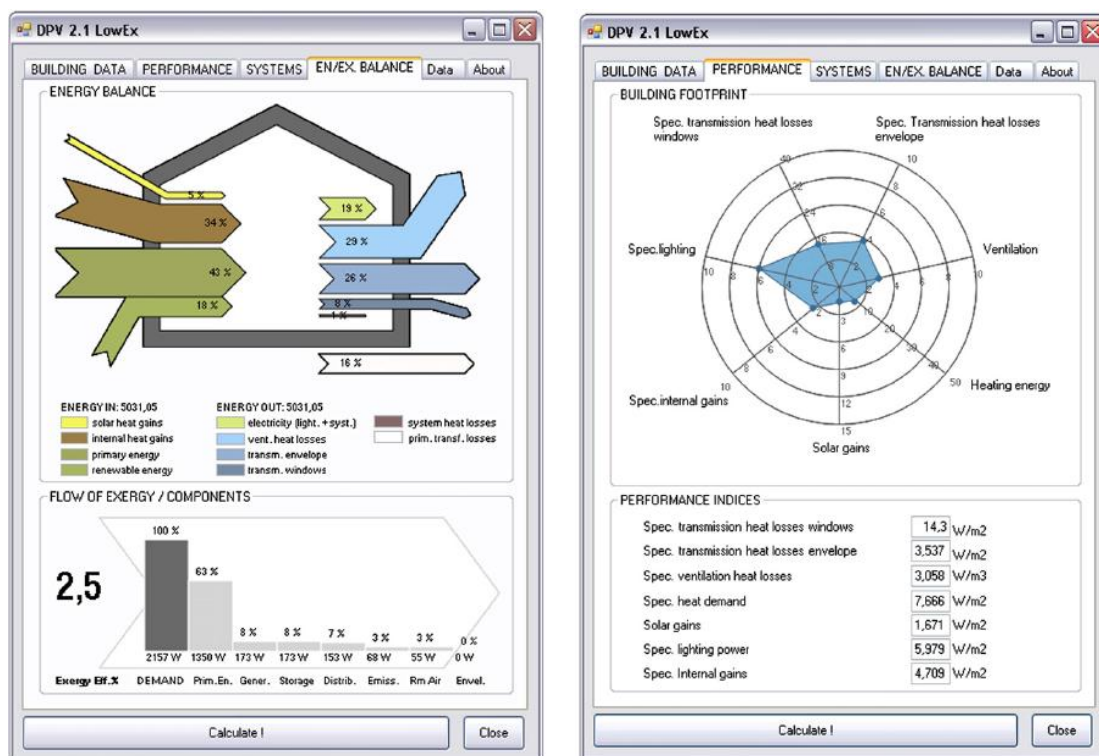
2.2.4.2 *Building information model based energy/exergy performance assessment in early design stages - Authors: Arno Schlueter, Frank Thesseling - Accepted 12 July 2008*

Questa pubblicazione, è stata analizzata in quanto descrive la costruzione di un modello energetico basato sull'informazione/valutazione delle prestazioni exergetiche nelle fasi iniziali della progettazione utilizzando il BIM. Al fine di valutare le prestazioni della forma, dei materiali e degli impianti tecnici, la valutazione della prestazione energetica deve essere perfettamente integrata nel processo di progettazione. In questo approccio, la capacità di accedere ad modelli di informazioni multi-disciplinari è utilizzata per l'accesso ai parametri necessari per il calcolo delle prestazioni in tempo reale. Oltre al calcolo dei bilanci energetici, il concetto di exergia viene utilizzato per valutare la qualità delle fonti di energia, con una conseguente maggiore flessibilità nelle valutazioni per ottimizzare la progettazione degli edifici. Si riporta qui di seguito uno schema di funzionamento del modello descritto nell'articolo.



Da questo schema si osserva come sia stata pensata una sorta di interfaccia IFC che consente di importare / esportare le informazioni dal BIM. In questo lavoro sono

descritti diversi modelli di calcolo fra ai quali Trnsys e Energy Plus. È inoltre descritta l'applicazione del bilancio exergetico alle differti componenti del sistema edificio-impianto. Infine è mostrata l'implementazione di un interfaccia grafica prototipo che si basa sul modello BIM creato all'interno del software Revit di cui si riportano qui di seguito alcune immagini.



2.2.4.3 Methodology to estimate building energy consumption using EnergyPlus Benchmark Models - Authors: Nelson Fumo, Pedro Mago, Rogelio Luck - Accepted date: 23-07-2010

Il presente lavoro è stato analizzato in quanto tratta una metodologia semplificata per stimare il consumo energetico dell'edificio utilizzando come parametri di riferimento EnergyPlus Benchmark Modelli, partendo dai dati inerenti i consumi elettrici e di combustibile dell'edificio considerato. Questi modelli predefiniti sono stati sviluppati dall'agenzia americana per l'energia per i nuovi fabbricati; il numero di modelli sviluppato è tale da rappresentare tutto il territorio degli Stati Uniti d'America. Il presente lavoro illustra un approccio semplice per stimare il consumo di energia dell'edificio in modo da poter valutare con maggior cognizione di causa l'installazione di impianti che sfruttano le fonti rinnovabili, questo è fatto sfruttando il modello di simulazione energy plus.

2.2.4.4 Evaluation of adaptive thermal comfort models in moderate climates and their impact on energy use in office buildings - Authors: Maarten Sourbron, Lieve Helsen - Accepted: 3 October 2010

Il presente lavoro è stato analizzato in quanto mette a confronto il modello di calcolo del comfort adattivo interno agli ambienti, basato oltre che sul modello ASHRAE55, sulla norma EN15251 in condizioni di clima moderato europeo. Tale modello è stato messo a confronto con lo standard ISO 7730 che rappresenta un modello non adattivo, e come riportato nel presente lavoro, non tiene conto delle condizioni esterne all'ambiente.

2.2.4.5 Building envelope regulations on thermal comfort in glass facade buildings and energy-saving potential for PMV-based comfort control - Authors: Ruey-Lung Hwang, Shiu-Ya Shu - Accepted: 9 October 2010

Il presente lavoro analizza le condizioni di comfort interne in edifici con grandi superfici vetrate. Nelle simulazioni riportate, eseguite con l'ausilio del motore di calcolo energy plus, sono messe in evidenza le variazioni dei parametri PPD e PMV dovute al utilizzo di differenti tipi di vetro e ombreggiamenti. È inoltre valutato il risparmio energetico conseguente in funzione del comfort raggiunto.

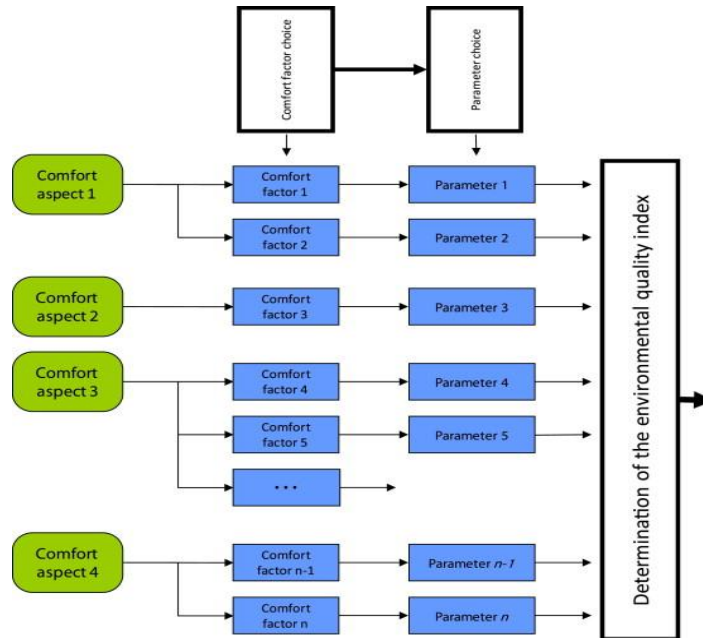
2.2.4.6 Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN15251 - Authors: Fergus Nicol, Michael Humphreys - Accepted: 29 December 2008.

La presente pubblicazione è stata presa in considerazione perchè analizza la norma EN 15251 (più avanti richiamata), che valuta le condizioni di comfort, termico, visivo e acustico interno agli ambienti. Questo lavoro mette in relazione le condizioni di comfort interne con il clima esterno. Infine nello stesso si paragonano le tabelle con i parametri utilizzati nello standard ASHRAE 55 con quelle riportanti i parametri utilizzati nella EN 152051.

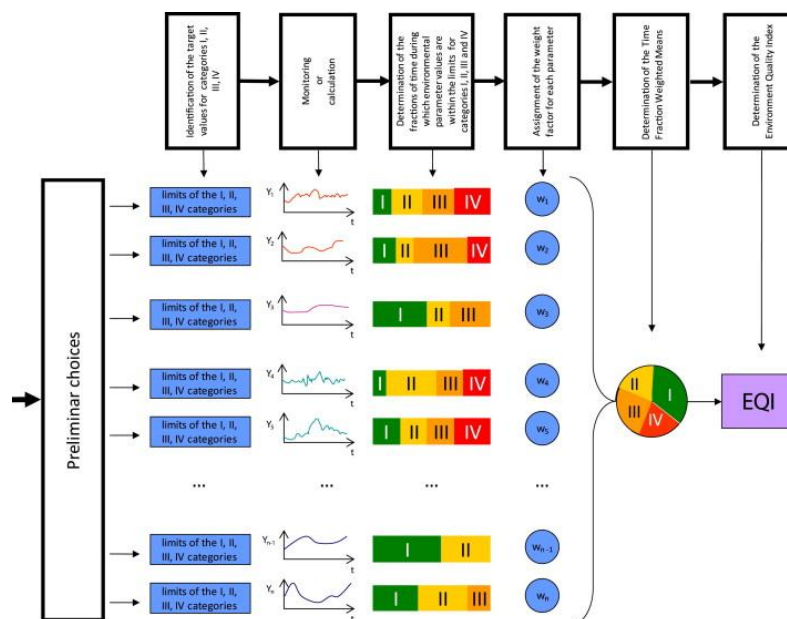
2.2.4.7 Proposal of comfort classification indexes suitable for both single environments and whole buildings - Authors: Concettina Marino, Antonino Nucara, Matilde Pietrafesa - Accepted: 19 April 2012

Questa pubblicazione è stata analizzata in quanto tratta una procedura per classificare un edificio tenendo conto dei differenti aspetti messi a confronto, quali Energia, Acustica etc. Il grafico sotto riportato descrive i differenti aspetti iniziali usati per classificare. Per

esempio considerando il comfort a livello acustico, potrebbero essere presi più indicatori, in funzione della destinazione d'uso del vano, come l'isolamento acustico offerto dalle pareti rivolte all'esterno e il tempo di riverberazione dello stesso



Il modello descritto consente l'attribuzione di indici di prestazione ai singoli ambienti in funzione della loro destinazione d'uso. La categoria assegnata, per esempio ad un corridoio o a una camera, oltre a considerare la destinazione d'uso tiene conto anche del tempo di permanenza che vi è nei differenti ambienti, considerando più importanti quelli dove si soggiorna per più tempo.



La figura su riportata rappresenta lo schema logico seguito per assegnare l'indicatore di prestazione; qui di seguito si riporta la tabella con le categorie previste dalla procedura.

Category	Explanation
I	High level of expectation, recommended for spaces occupied by very sensitive and fragile persons with special requirements (handicapped, sick, elderly persons and very young children)
II	Normal level of expectation, should be used for new buildings and renovations
III	Acceptable, moderate level of expectation, may be used for existing buildings
IV	Values outside the criteria for the above categories. This category should only be accepted for a limited part of the year.

L'ultima fase, prevista dalla procedura analizzata, assegna all'intero edificio la valutazione della qualità "indoor" mediante la costruzione di un indice chiamato BQI "*Building Quality Index*". Questo indice tiene conto della classificazione assegnata ai singoli ambienti. La relazione utilizzata per ricavare questo indicatore di qualità è:

$$BQI = \{EQI\}^T \cdot \{k\}$$

$$k_i = \frac{K_i}{\sum_{j=1}^N K_j}$$

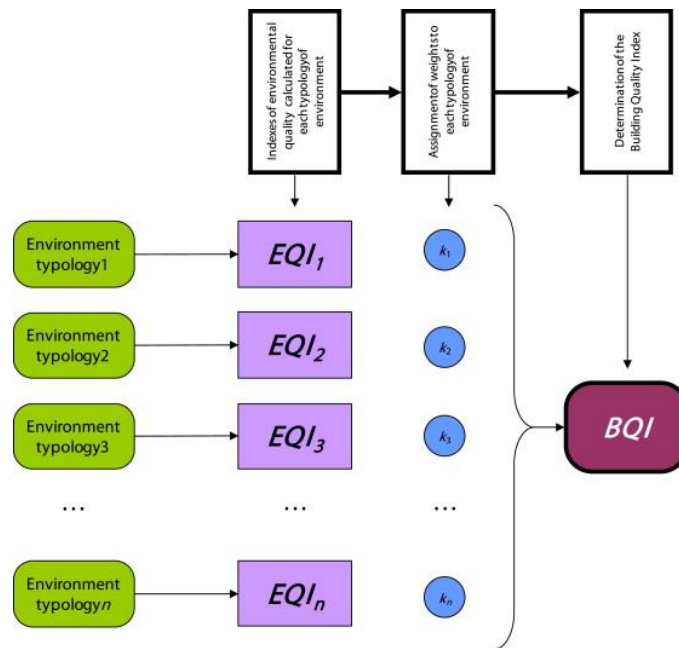
Dove:

BQI è il *Building Quality Index*

EQI_i è il vettore che contiene l'ambiente interno e tutti gli indici di qualità utilizzati per l'i-esimo ambiente

K_i è la grandezza assegnata ad ogni singolo ambiente che potrebbe essere il volume di questo o la sua superficie o il numero delle persone.

La figura riportata qui sotto, evidenzia il diagramma di flusso di informazioni, utilizzato dalla procedura per assegnare ad un intero edificio l'indicatore di qualità.



2.2.4.8 Heating and Cooling with Focus on Increased Energy Efficiency and Improved Comfort, Guidebook to IEA ECBCS Annex 37, Low Exergy Systems for Heating and Cooling of Buildings – ECBCS Annex 49 Low Exergy system for High-Performance Building and Communities

Questa serie di lavori/pubblicazioni sono state analizzate in quanto al loro interno riportano una metodologia per eseguire l'analisi exergetica del sistema edificio-impianto. Tale pubblicazione fa rimando a un modello di simulazione exergetica implementato su foglio di calcolo che è stato studiato analizzato e implementato all'interno del modello. Si riporta di seguito, un diagramma di flusso (Figura 2-6 (diagramma di flusso aspetti exergetici)), tratto dalle pubblicazioni analizzate, che spiega come dovrebbero essere relazionati i diversi aspetti di un edificio per l'analisi/ottimizzazione exergetica. In altre parole si spiega come applicare il bilancio exergetico al sistema edificio-impianti.

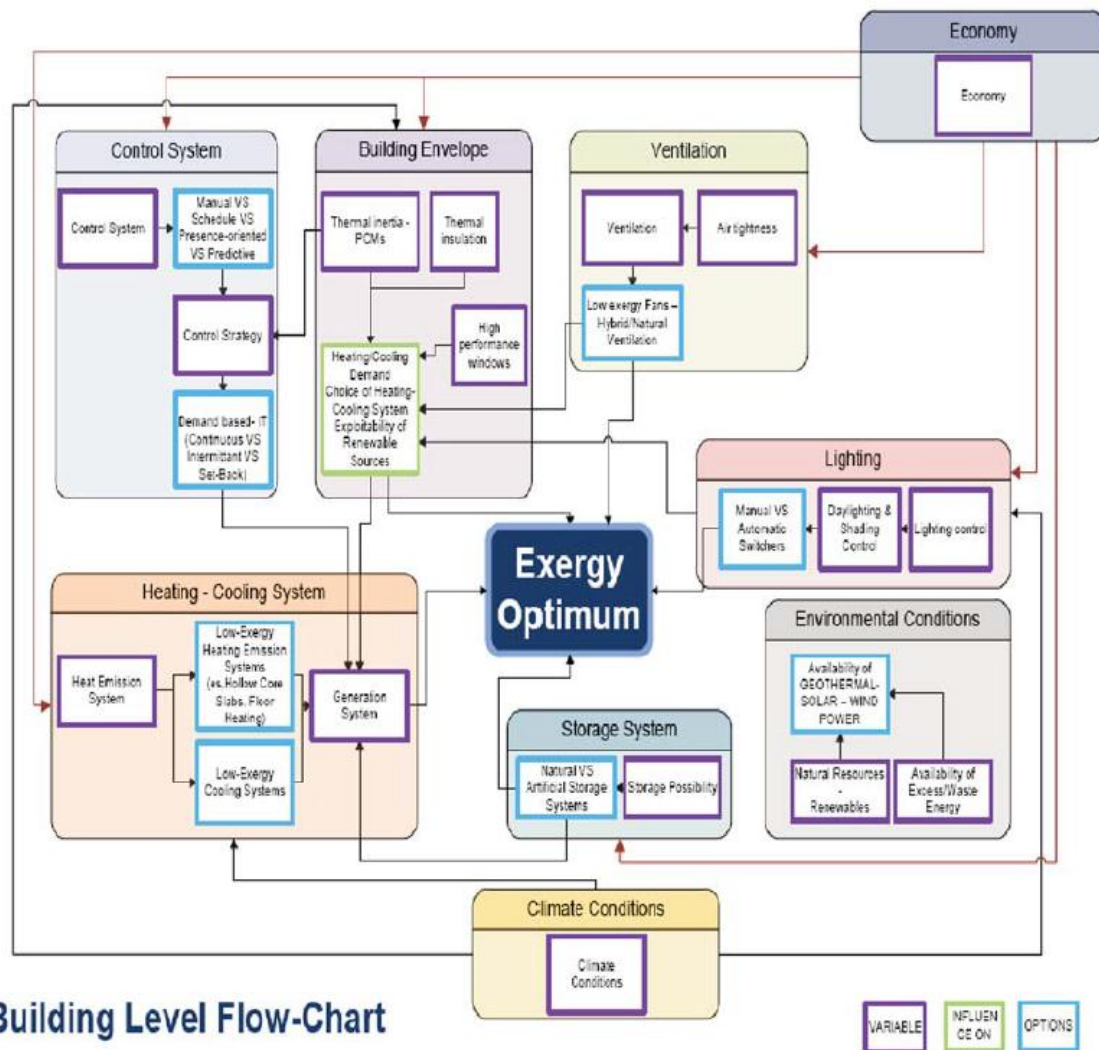


Figura 2-6 (diagramma di flusso aspetti exergetici)

Nel modello proposto è definito un fattore di qualità “q” legato alla quantità di calore “Q” definito come:

$$q(T) = \left| 1 - \frac{T_0}{T} \right|$$

Quando q è molto elevato, l’exergia E è elevata, tuttavia le perdite del sistema sono di grandi dimensioni. Questa condizione si verifica tanto più T è maggiore di T₀. Invece, quando q è basso, il trasferimento exergia \dot{E}^Q è basso, ma risultano piccole le perdite nel sistema. Questa condizione si verifica quando il calore Q viene fornito ad una temperatura T vicina a T₀ (vedi Figura 2-7 (fattore di qualità dell'exergia))

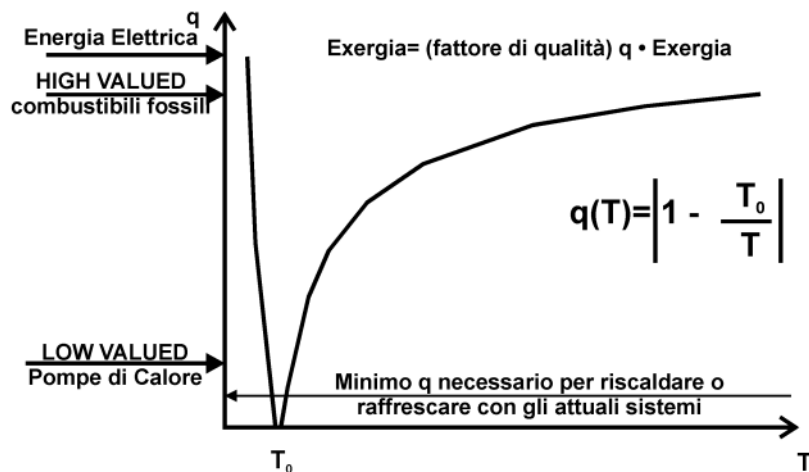


Figura 2-7 (fattore di qualità dell'exergia)

Gli aspetti considerati nella procedura descritta trattano principalmente:

- La richiesta di exergia legata all'involucro edilizio inserito in un dato contesto climatico;
- La richiesta di exergia legata al riscaldamento dell'aria dell'ambiente;
- Exergia legata al sotto sistema di emissione;
- Exergia legata al sotto sistema di distribuzione;
- Exergia legata al sotto sistema di accumulo;
- Exergia legata al sotto sistema di generazione;
- Exergia totalmente impiegata.

I risultati ottenuti con tale procedura consentono l'analisi delle trasformazioni che compie l'energia primaria impiegata nelle differenti fasi di trasformazione, distribuzione, emissione etc. Alle suddette fasi è affiancata l'analisi exergetica che evidenzia le fasi del processo più deboli (che creano più sprechi), dando uno strumento per ottimizzare tale processo.

Qui sotto sono riportate delle tabelle, presenti nell'"annex 37 –Guide Book" che riportano un sommario delle tecnologie "Low Ex".

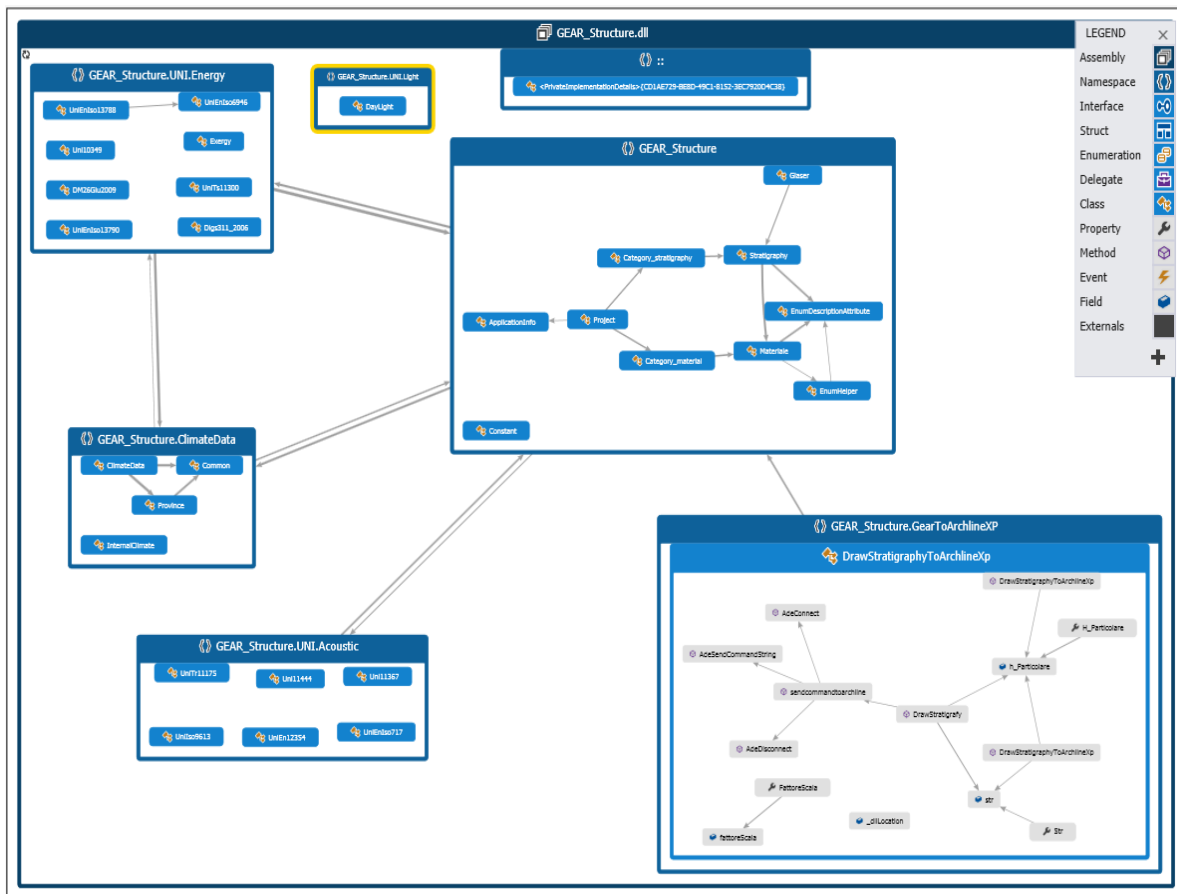
No.	WHAT ?	Suitable for							State of the art	Costs	Cooling temp. [°C] 0 100	Heating temp. [°C] 0 100
		Residential	Non-residential	New	Retrofit	Concept	Experimental	Commercial				
S SURFACE HEATING AND COOLING												
S.1 Floor heating												
S.1.1	Embedded coils in slabs		X	X				X				
S.1.2	Coils in surface layers	X	X	X	X			X				
S.1.3	Hollow core slabs		X	X	X			X	↕			
S.1.4	Suspended floors	X	X	X				X	↕			
S.1.5	Phase change in floor heating	X	X	X	X		X		↗			
S.2 Wall heating and cooling												
S.2.1	Pipes in surface layers (wet/half wet, mounted)	X	X	X	X			X				
S.2.2	Pipes in surface layers (half-dry embedded)	X	X	X				X				
S.2.3	Pipes in surface layers (wet, embedded)	X	X	X				X				
S.2.4	Pipes in surface layers (dry systems)	X	X	X	X			X				
S.2.5	Double walls	X	X	X	X	X			↗			
S.2.6	Dynamic insulation	X	X	X	X			X	↕			
S.2.7	Capillary tubes	X	X	X	X			X	↕			
S.3 Ceiling cooling and heating												
S.3.1	Radiative panel	X	X	X	X			X	↕			
S.3.2	Cooling beams		X	X	X			X	↕			
S.3.3	Ceiling integrated system	X	X	X	X			X				
S.3.4	Evaporative roof surfaces		X	X	X			X				
S.3.5	Ceiling panel cooling by double-roofing with water spray	X		X	X	X	X			Wet bulb temperature		
S.4 Local heaters												
S.4.1	Low temperature radiators/convectors	X	X	X	X			X	↕			
S.4.2	Radiators integrated in the interior design		X		X	X		X	↕			
S.4.3	High temperature radiators	X	X	X	X			X				
S.4.4	Base board heaters	X	X	X	X			X				
S.4.5	Transparent insulation	X	X	X	X			X	↗			
A AIR HEATING AND COOLING												
A.1 Air to air heat exchangers												
A.1.1	Sensible only heat exchangers / Recuperator	X	X	X	X			X	↕			
A.1.2	Counter flow air to air heat exchangers/ Recuperator	X	X	X	X			X	↕			
A.1.3	Total (latent) heat exchangers / Regenerator		X	X	X			X	↕			
A.1.4	Altering heat exchangers		X	X	X			X	↕			
A.2 Water to air heat exchangers												
A.2.1	Supply air conditioning	X	X	X	X			X	↕			
A.2.2	Fan coil units	X	X	X	X			X				
A.3 Steam / vapour to air heat exchangers												
A.3.1	Supply air conditioning	X	X	X	X			X	↕			
A.4 Other heat exchangers												
A.4.1	Supply air façade		X	X	X			X	↕			
A.4.2	Evaporative cooling	X	X	X	X			X				

No.	WHAT ?	Suitable for				State of the art			Costs	Cooling temp. [°C] 0 100	Heating temp. [°C] 0 100
		Residential	Non-residential	New	Retrofit	Concept	Experimental	Commercial			
A.5 Passive systems											
A.5.1	Atria		X	X				X	↔		
A.5.2	Solar chimneys		X	X				X	↗		
G GENERATION / CONVERSION OF COLD AND HEAT											
G.1 Boiler											
G.1.1	Condensing boilers	X	X	X	X			X	↔	-	
G.1.2	Pulsating gas boiler	X		X	X			X	↔	-	50-60
G.2 Ground heat											
G.2.1	Ground coils	X	X	X				X	↔	8-16	-
G.2.2	Bore hole	X	X	X	X			X	↔	8-16	16-22
G.2.3	Slab on ground		X	X				X	↘	16-22	-
G.3 Heat pumps											
G.3.1	Compressor heat pumps	X	X	X	X			X	↔	10-15	25-50
G.3.2	Absorption heat pumps		X	X	X			X	↗	10-15	-
G.4 Solar collectors											
G.4.1	Flat plate collectors	X	X	X	X			X	↔	-	20-60
G.4.2	Evacuated tube collectors	X	X	X	X			X	↘	-	20-120
G.4.3	Unglazed flat-plate collectors	X		X	X			X	↘	-	20-60
G.5 Combined heat and power generation											
G.5.1	Cogeneration units with gas motor	X	X	X	X			X	↔	-	80-90
G.5.2	Cogeneration units with microturbines		X	X			X		↗	-	
G.5.3	Cogeneration units with stirling motor		X	X			X		↗	-	
G.6 Fuel cells											
G.6.1	Fuel cells	X	X	X	X			X	↗	-	
G.7 Biological systems / Metabolic											
G.7.1	Bacteria		X	X	X	X			↔	-	20-60
G.7.2	Animals	X	X	X		X			↔	-	20-35
G.7.3	Plants	X	X	X	X		X		↔	20-25	-
T THERMAL STORAGE											
T.1 Seasonal storage											
T.1.1	Ground / rock storage	X	X	X	X			X	↔	8-20	40-100
T.1.2	Earth duct storage	X	X	X	X			X	↔	10-15	45-75
T.1.3	Hot water storage	X	X	X	X			X	↗	-	35-95
T.1.4	Phase change thermal storage		X	X	X		X	X	↗		
T.2 Short term storage											
T.2.1	Buffer storage tank	X	X	X	X			X	↔	5-15	40-90
T.2.2	Domestic hot water tank	X		X	X			X	↔		45-60
D DISTRIBUTION											
D.1 Transfer medium											
D.1.1	Air	X	X	X	X			X	↔		
D.1.2	Water	X	X	X	X			X	↔		
D.1.3	Thermax® heat carrier	X	X	X	X			X			
D.1.4	Glycol	X	X	X	X			X			
D.2 Community systems											
D.2.1	District heating	X	X	X	X			X		-	65-115
D.2.2	District cooling	X	X	X	X		X	X	↔	6-10	-

3 Modello di calcolo sviluppato

Il modello di calcolo ideato e sviluppato nella presente ricerca è in grado di gestire contemporaneamente diversi aspetti fisici legati alla progettazione degli edifici. Uno dei requisiti fondamentali che il modello soddisfa, così come richiesto dalla Cadline Software, è l'esecuzione dei calcoli secondo le procedure previste dalle diverse norme UNI, EN ed ISO richiamate all'interno della legislazione vigente del settore o in ogni caso di riferimento.

Un'altra specifica, che il modello rispetta, è l'interfacciamento/ interoperabilità con il modello geometrico generato con l'ausilio del cad architettonico tridimensionale Archline XP della Cadline Software.



Il modello, sviluppato utilizzando l'ambiente di sviluppo Visual Studio, è stato scritto sfruttando la programmazione ad oggetti con linguaggio C++ e principalmente con il linguaggio C#; lo stesso ha una dimensione di circa 20.000 righe.

Nella scrittura del codice si sono suddivise le diverse funzionalità sviluppando più progetti i cui aspetti sono stati messi in correlazione generando da ciascuno di essi delle dll. Questo aspetto è risultato fondamentale nella fase di verifica, di correzione degli errori rilevati e di ottimizzazione degli algoritmi in quanto si andava ad operare sulla specifica parte del codice (componente).

3.1 Principali Componenti

Le principali componenti che costituiscono il modello sono:

- Gear Structure
- Gear To Archline Xp
- Gear Graphics Structure

3.1.1 Gear Structure

La parte più impegnativa nello studio delle funzionalità è stata la strutturazione dei dati che il modello informatico doveva gestire; tale strutturazione è sviluppata all'interno della componente GEAR Structure. All'interno della suddetta componente si sono sviluppate e implementate le funzionalità di seguito riportate.

3.1.1.1 ClimateData

Il name space "ClimateData" (questo termine è utilizzato in informatica per descrivere "un raggruppamento di classi") contiene al suo interno tutte le classi e i metodi avanzati per la gestione dei dati climatici. Esso è stato pensato prevedendo quattro classi denominate:

- ClimateData

Questa è la classe principale richiama al suo interno tutte le altre classi. Da questa classe si può accedere ai dati caricati per le singole provincie e per i comuni appartenenti alle provincie inoltre consente di gestire i dati relativi al clima interno e da accesso alle costanti.

- Constant (condivisa a livello progetto)

All'interno di questa classe sono richiamate tutte le costanti utilizzate nei calcoli, le stesse possono essere modificate dall'operatore e serializzate nel flusso di dati nella fase di calcolo o salvataggio del progetto.

- InternalClimate

La classe sul clima interno riporta al suo interno le variabili e i metodi per la restituzione di tutti quei parametri necessari per il calcolo. Nello specifico questa classe può essere utilizzata per descrivere il clima assegnato (o calcolato) per un'intera zona o per il singolo vano. Al suo interno sono riportate le grandezze che descrivono gli aspetti termici, igrometrici, acustici e di illuminazione diurna.

- Province

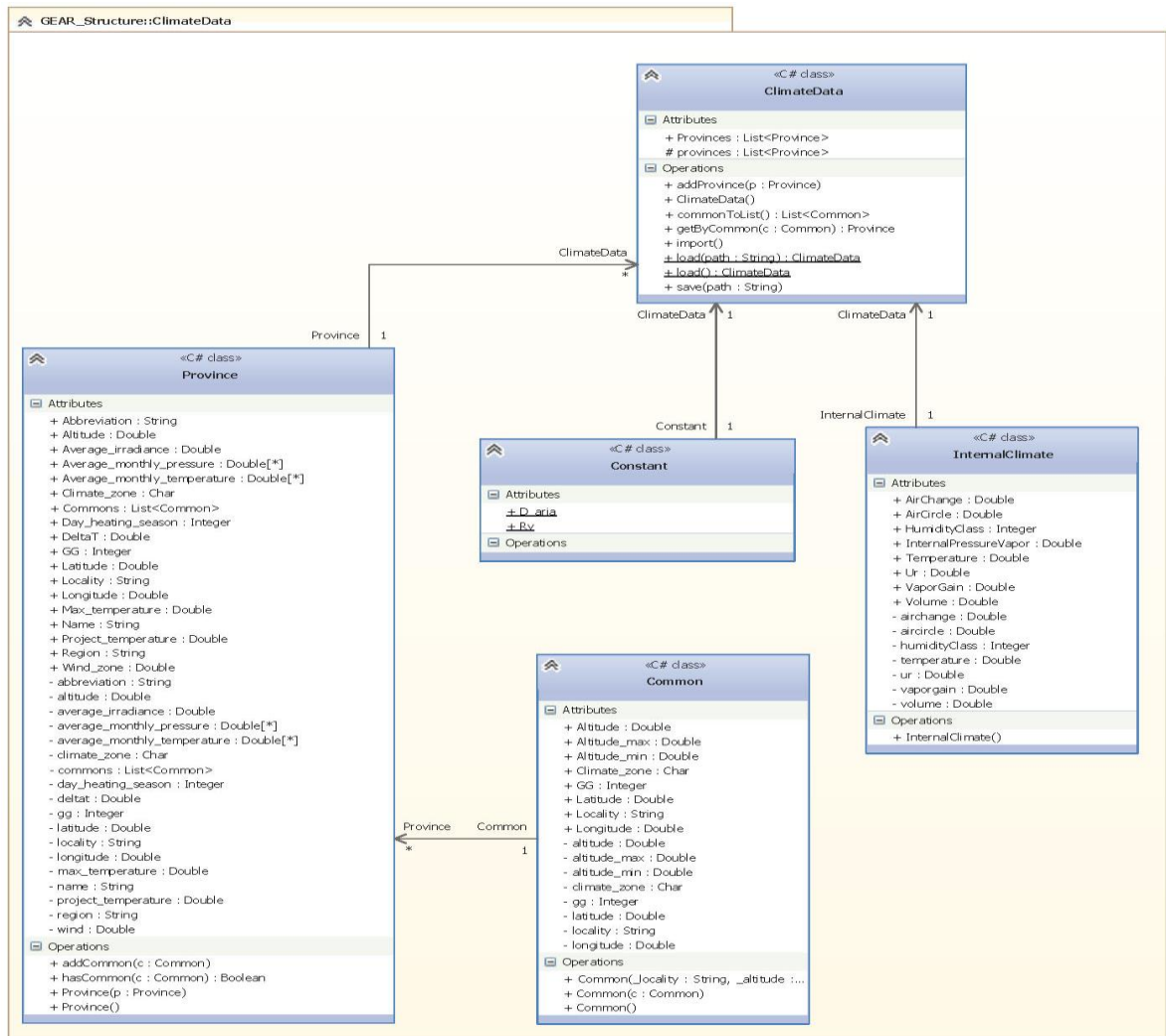
L'oggetto province gestisce al suo interno oltre la lista dei comuni appartenenti alla specifica provincia, tutti quei dati disponibili su base provinciale per i capoluoghi di provincia (per esempio i dati climatici previsti dalla norma UNI 10349).

- Common

Questa parte della struttura gestisce tutte le informazioni legate al singolo comune. Al suo interno sono riportati i vari metodi che consentono la modifica delle impostazioni di default come ad esempio la modifica delle temperature in funzione dell'altezza s.l.m. (questo è possibile anche dialogando con altre applicazioni esterne come ad esempio "Google Earth" da cui è possibile ricavare in maniera interattiva coordinate, orientamenti etc).

Si riporta qui di seguito lo schema base di funzionamento del namespace "ClimateData" in cui sono indicate le principali relazioni. I termini "*" e "1" posizionati agli estremi delle frecce di connessione delle diverse tabelle hanno il seguente significato: "*" = molti; "1" = uno; "→" = contiene

Per esempio la sequenza (Common 1 → Province *) indica che il comune può appartenere ad un solo oggetto provincia, mentre l'oggetto provincia può contenere tanti oggetti di tipo "Common"



3.1.1.2 Gestore_Materiali

Il name space “Gestione Materiali” gestisce i singoli materiali e i sistemi costruttivi. Esso rappresenta in un certo senso il cuore del modello di calcolo, infatti tutti i name space e le classi fanno riferimento a lui per poter eseguire le diverse funzioni. Questo name space è stato pensato e sviluppato tenendo conto delle differenti proprietà fisiche e proprietà costruttive che i differenti materiali e in particolare i sistemi costruttivi possono avere. Il gestore è costituito da cinque classi principali e da diverse tipologie (tipo formule, mese di riferimento, tipologia materiale/strato). Le classi sono state così organizzate:

- Material

Questa classe gestisce le differenti proprietà fisiche dei materiali, al suo interno sono definite le variabili quali permeabilità al vapor d’acqua, conducibilità

termica, rigidità dinamica e così via. Oltre a questo sono stati implementati diversi metodi che consentono di impostare o restituire valori quali conduttanza (nel caso il materiale abbia uno spessore come ad esempio un pannello isolante omogeneo), massa per unità di area, diffusività termica etc. il tutto per consentire di gestire le diverse caratteristiche dei materiali o sistemi costruttivi.

- Stratigraphy

La componente stratigraphy può gestire al suo interno “molte” componenti material. In altre parole ha la funzione di gestire i vari assemblaggi dei materiali utilizzati per definire i differenti componenti edilizi sia dell’involucro che interni. Al suo interno sono implementati diversi metodi che consentono alla classe di restituire i diversi indicatori di prestazione del componente edilizio o se si hanno a disposizione valori sperimentali di laboratorio ne consentono la loro impostazione; ad esempio sono restituiti o impostati:

- Trasmittanza;
- Potere fonoisolante (curve in frequenza 50-5KHz/100-3150Hz / 100-5KHz);
- Permeanza;
- Conduttanza;
- Indice del potere fonoisolante
- Massa Frontale
- Massa Superficiale secondo D.lgs 311/06;
- Costo;

Concludendo, questo componente consente la gestione, il calcolo o l’impostazione di tutti quei parametri fisici/economici dei diversi componenti edilizi.

- Glaser

La classe “Glaser” si occupa di eseguire il calcolo dell’andamento delle pressioni di vapore al interno dei componenti edilizi. I principali metodi fanno riferimento alla classe UNI13788 che implementa l’omonima norma.

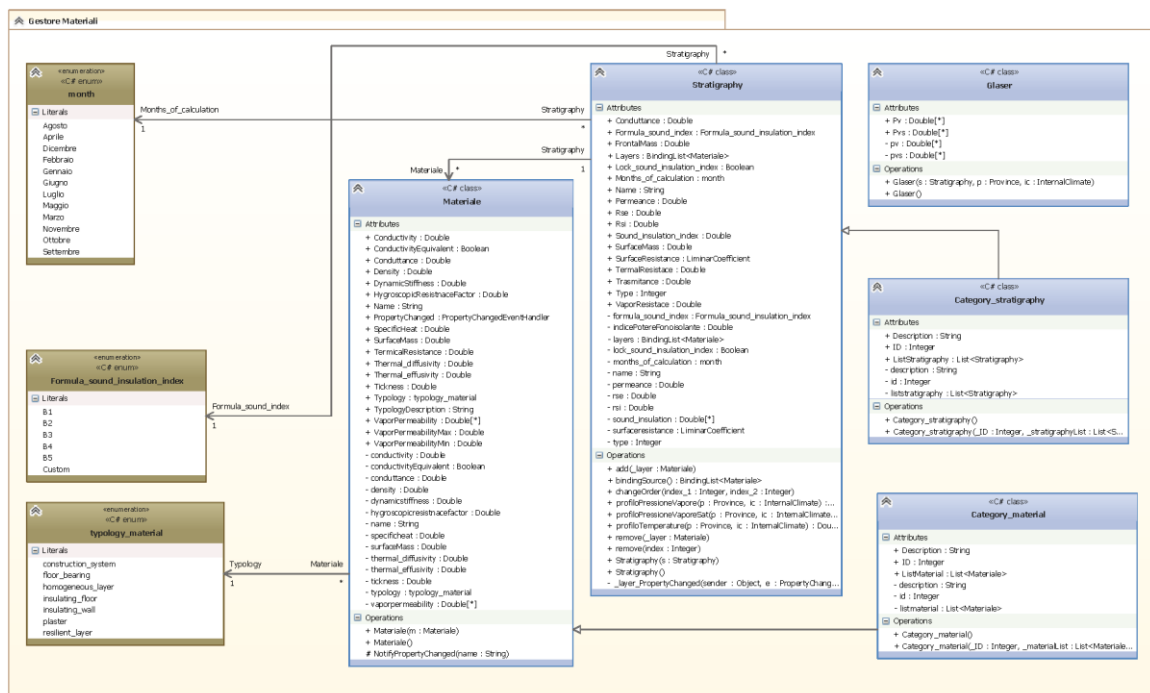
- Category stratigraphy

Gestisce una lista di stratigrafie alla quale è possibile accedere con diversi criteri di selezione. Questa classe è molto importante per i metodi di ricerca interattiva in quanto consente di visitare tutti i componenti presenti in archivio e selezionare quelli che rispettano i criteri di selezione impostati.

- Category material

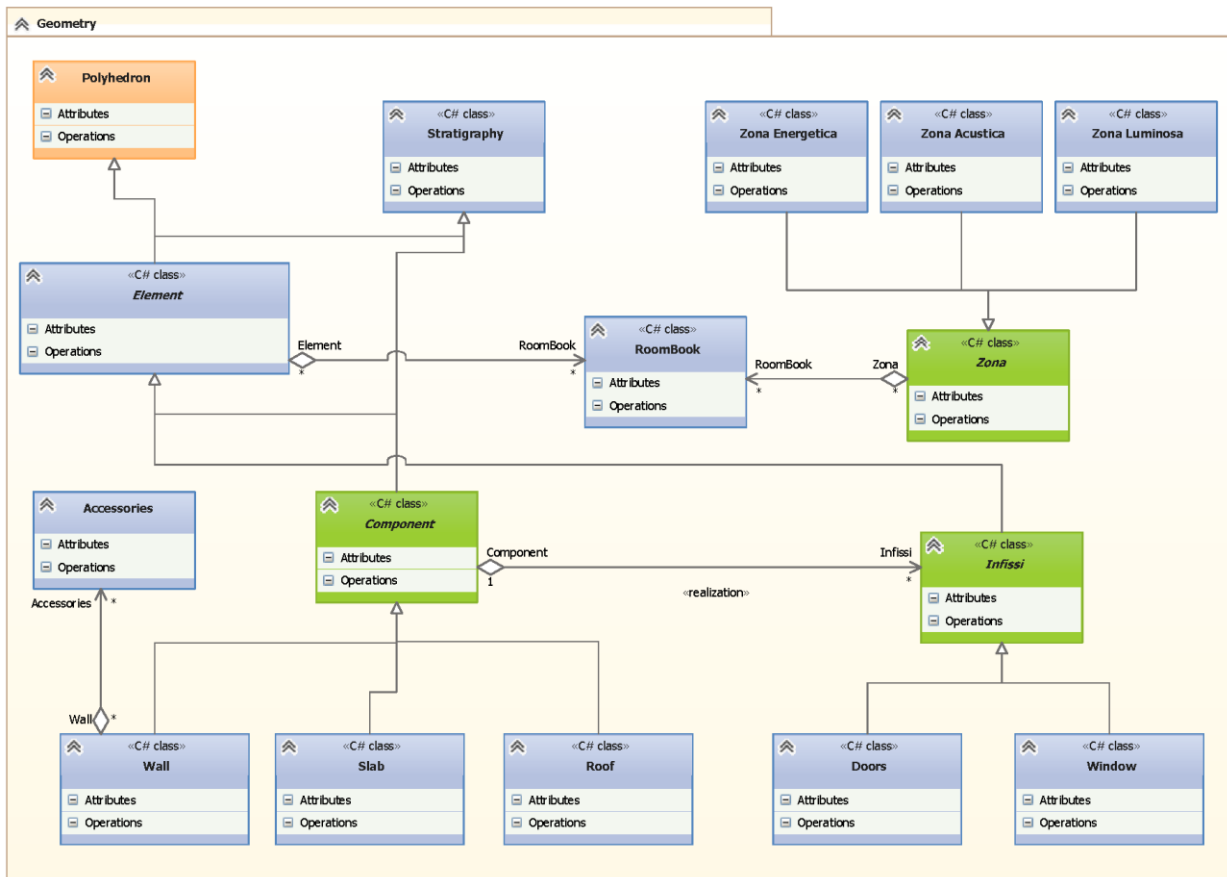
Simile alla precedente classe gestisce le liste dei singoli materiali (o sistemi costruttivi che possano essere considerati come strato “Layer” omogeneo o non omogeneo). Anche questa classe può essere visitata dai metodi di ricerca interattivi ai fini di selezionare il materiale più adatto, fra quelli presenti, ad un dato contesto.

Si riporta qui di seguito lo schema del name space Gestione Materiali, dove sono riportati i principali collegamenti fra i diversi componenti e le relative dipendenze, associazioni o aggregazioni fra le classi.



3.1.1.3 Geometry

Qui di seguito si riporta lo schema del name space “Geomery”. In questa parte il modello studiato si occupa di gestire le “geometrie” (in senso stretto e in senso lato) infatti al suo interno sono definite le diverse classi per la gestione delle Zone (energetiche, acustiche e luminose) costituite a loro volta da liste di Roombook (vani).



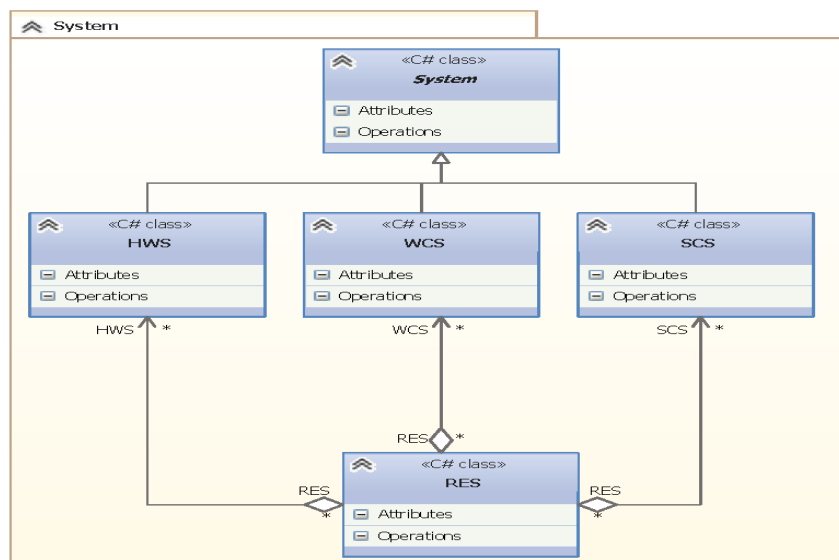
Come si può osservare dallo schema, dove con il colore verde si evidenziano le classi astratte, si sono costituite le seguenti classi principali:

- **Zona**
 La classe astratta “Zona” serve a costituire una base comune per le tre tipologie di zone che il modello può gestire. Essa al suo interno richiama le proprietà presenti nelle classi “Zona Luminosa”, “zona acustica” e “Zona Energetica”. Essa è in grado di gestire tutti i parametri di impostazione tipici, come ad esempio: temperatura invernale dell’area interna, destinazione d’uso ai fini acustici o del day light factor, impianto o impianti ad essa associati.
- **Component**
 Questa classe astratta gestisce tutti i metodi e le variabili base dei diversi componenti edilizi (pareti, solai, tetti, infissi). Al suo interno sono richiamati i metodi presenti nel name space UNI-EN-ISO-Calcoli, all’interno del quale sono implementate tutte le metodologie di calcolo presenti nel modello.
- **Roombook**

Rappresenta una delle classe più importanti del modello, essa è la classe dove sono contenute, elaborate e restituite le informazioni sui singoli vani che compongono le differenti zone. Questa classe al suo interno può gestire numerose liste di altri oggetti, come ad esempio liste di elementi, e può appartenere a differenti zone come per esempio quelle acustiche ed energetiche. La classe contiene inoltre tutta una serie di informazioni geometriche quali superfici, volumi, orientamenti e esposizione delle differenti superfici che compongono il vano.

3.1.1.4 System

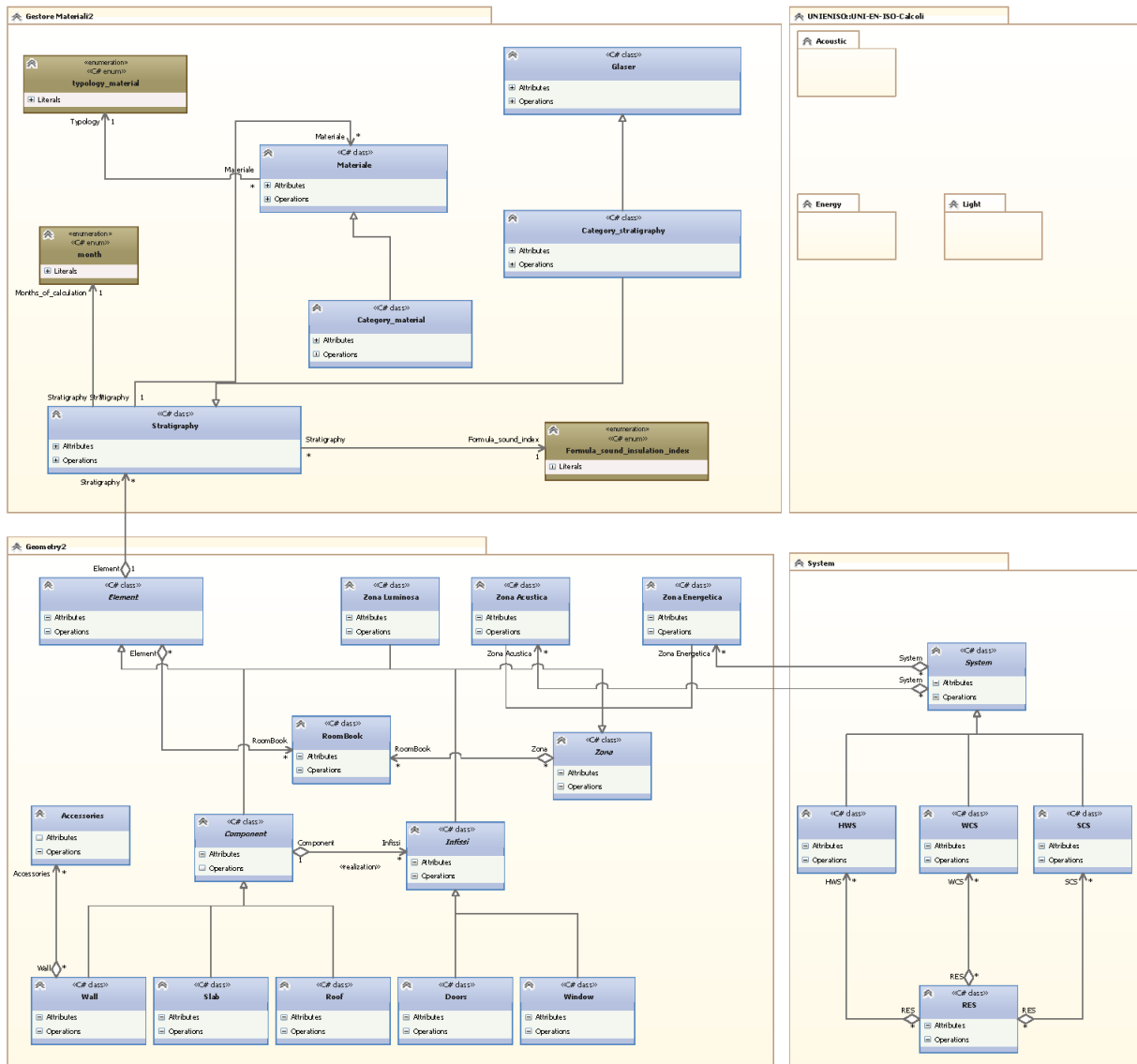
Il name space system contiene le classi, i metodi e le gestisce le banche dati per la valutazione degli impianti sia dal punto di vista energetico sia dal punto di vista acustico. All'interno di questo name space sono presenti tre classi principali che gestiscono le sottoclassi dei sottosistemi impiantistici come ad esempio Generazione, distribuzione, emissione e etc. Si riportano di seguito lo schema delle classi principali che costituiscono il name space System del modello di calcolo.



Come si può osservare dal grafico, le classi principali implementano i metodi, secondo le principali norme del settore, per gli impianti di climatizzazione invernale ed estiva, per la produzione di acqua calda sanitaria e per lo sfruttamento di questi delle RES.

3.1.1.5 General (PRJ)

La classe general convoglia tutti i metodi e le classi del modello, questa e la classe principale che le cui variabili saranno serializzate per salvare lo stato dei diversi componenti.



Lo schema sopra riportato mostra le relazioni tra le classi appartenenti ai diversi name space presenti nel modello e implementa tutte le funzionalità contenute nella dll GEAR Structure. Quest'ultima rappresenta la struttura dati dati fondamentale.

3.1.2 Gear To Archline Xp

La componente dll Gear To ArchlineXp e la parte del modello che ha il compito di dialogare con il cad architettonico tridimensionale Archline XP, essa rappresenta una

delle parti più innovative del modello di calcolo sviluppato e si occupa della gestione della geometria. La connessione con il CAD avviene tramite una dll chiamata Ade.2012.dll. Questa per essere utilizzata è stata referenziata all'interno del modello di calcolo.

Si riportano qui di seguito per esempio tre frammenti del codice, scritti in linguaggio C#, che si occupano rispettivamente di referenziare la dll ADE, di passare i parametri alla dll e di generare i parametri necessari per una data operazione (nello specifico la creazione di una stratigrafia)

- **Carica la dll per dialogare con archline**

```
private const string _dllLocation = "Ade.2012.dll";  
[DllImport(_dllLocation)]  
private static extern void AdeSendCommandString(string command);  
[DllImport(_dllLocation)]  
private static extern void AdeConnect(System.IntPtr Hwnd);  
[DllImport(_dllLocation)]  
private static extern void AdeDisconnect();
```

Le istruzioni su riportate servono a caricare il conduce della dll ADE all'interno del modello di calcolo GEAR

- **Passa i parametri ad archlineXP**

```
void sendcommandtoarchline(string command)  
{  
    AdeConnect(0); //apre la connessione con archline  
    AdeSendCommandString(command); //passa il comando sotto forma di stringa  
    AdeDisconnect(); //chiude la connessione di archline  
}
```

la sequenza di istruzioni riportate esegue l'apertura del collegamento con il cad, la trasmissione delle istruzioni da eseguire, la chiusura della connessione precedentemente aperta.

- **Genera i parametri per definire la stratigrafia**

```
public void DrawStratigrafy()  
{  
    string command = "#SYSTEMDIALOG line ";  
    int i;  
    int n = (str.Layers.Count);  
    string P1x, P1y; //variabili coordinate  
    double h = h_Particolare;
```

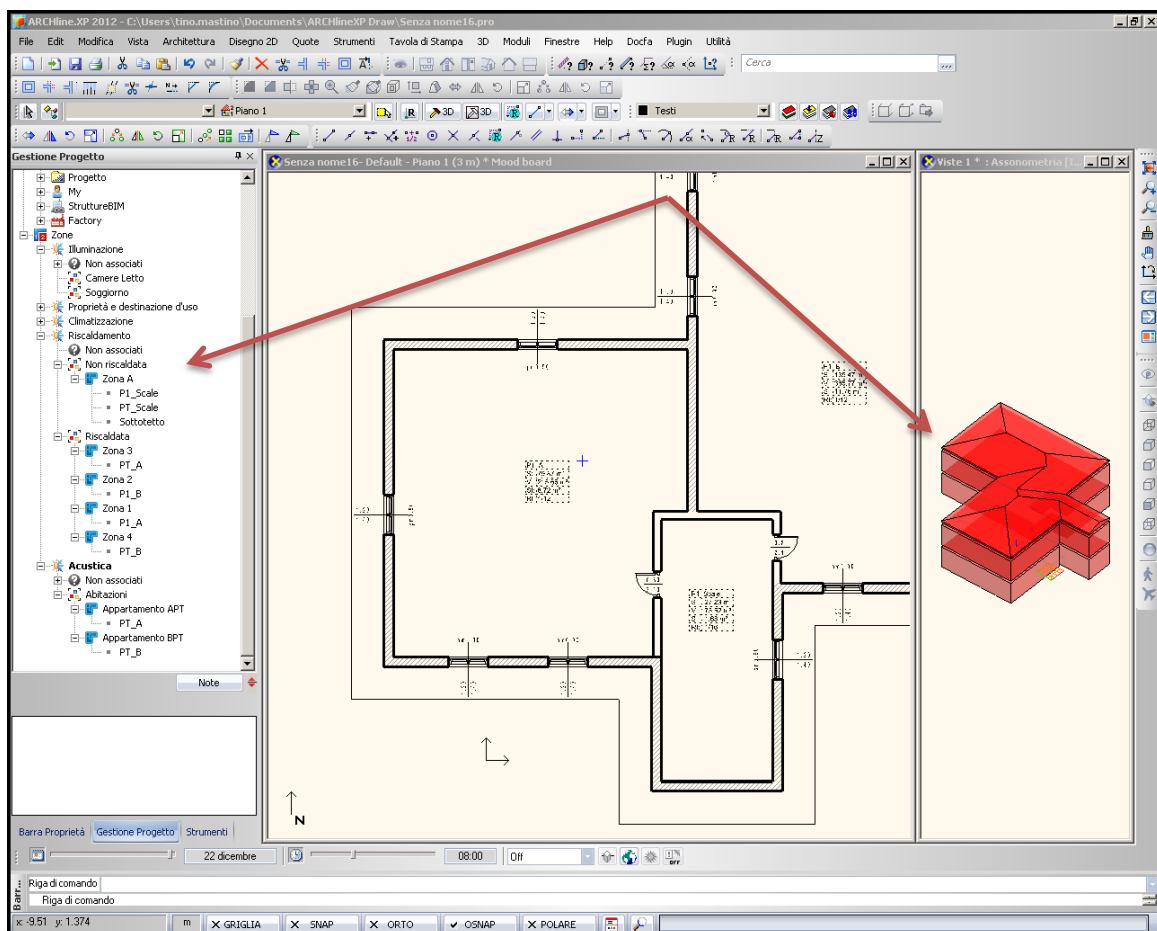
```

command += "0 0 0 0.5;";
for (i = 0; i < n; i++)
{
h = -h;
P1x = str.Layers[i].Tickness.ToString().Replace(",", ".");
P1y = (h).ToString().Replace(",", ".");
command += P1x + " 0 0 " + P1y + ";";
}
sendcommandtoarchline(command);
}

```

L'esempio di istruzioni qui riportato mostra il passaggio al metodo della classe stratigraphy (str) e come questa viene visitata per poi essere disegnata in archlineXP.

Con le tre sequenze su riportate è possibile dialogare in modo bidirezionale con il cad e gestire tutte le proprietà geometriche e la zonizzazione legata ad esse. Come si può osservare nell' immagine seguente.



Tali zone possono essere gestite interamente dal modello, tramite la connessione con il cad, o l'alternativa definite graficamente e importate nel modello. È possibile gestire differenti tipologie di zone definendo la geometria dei singoli "RoomBook" una sola

volta. Nell'immagine su riportata si evidenzia come gli stessi Roombook possano appartenere a differenti zonizzazioni (acustica, luminosa o energetica).

3.1.3 Gear Graphics Structure

La componente Graphis Structure si occupa di disegnare sotto forma di grafici o sezioni (come ad esempio il profilo dell'andamento della temperatura in una parete) tutti i risultati dei calcoli generati dal modello. Essa è completamente integrata e consente all'operatore diverse regolazioni della visualizzazione dei risultati.

3.2 Cosa fa il modello

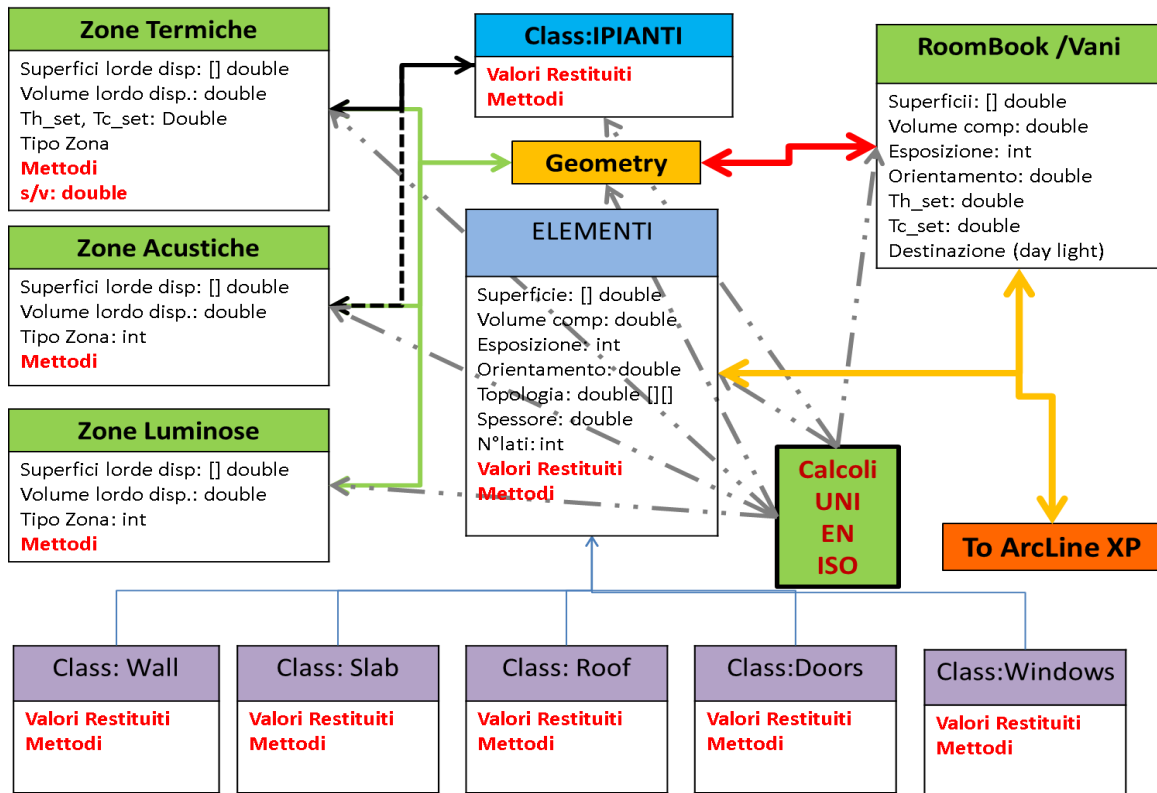
Il modello di calcolo costituisce un procedura unica che tratta contemporaneamente differenti problematiche fisiche legate alla progettazione edilizia. Il tutto avviene dialogando in maniera bidirezionale con il cad architettonico Archline XP il quale costituisce la base geometrica-grafica per il funzionamento interattivo del modello.

Una delle funzionalità del modello (la più innovativa) è quella nominata "parzializzazione dinamica delle geometrie" questa funzionalità consente di parzializzare in maniera interattiva i dati geometrici degli elementi costruttivi in funzione della zonizzazione di appartenenza considerata. Una descrizione più dettagliata di tale funzionalità si riporta nel paragrafo relativo ai caratteri innovativi della ricerca.

Di seguito si descrivono le differenti funzionalità.

Il modello per il suo funzionamento necessita di un'interfaccia utente molto laboriosa che va oltre lo scopo della presente ricerca, pertanto onde poter eseguire dei test sul modello creato, si sono sviluppate delle singole interfacce prototipo che si riportano nel presente paragrafo per meglio spiegare il funzionamento del suddetto modello.

Si riporta qui di seguito un diagramma di flusso semplificato sulle funzionalità del modello, da quale si può osservare la gestione delle informazioni provenienti da archline tramite la classi roombook e geometry. Queste classi condividono e suddividono le informazioni per le differenti zone e tipologie di calcolo.



Di seguito si riportano le interfacce prototipo create, che consentono l'input dati manuale e tramite il cad. In questa schermata si possono osservare tutte le principali funzionalità di calcolo che consente il modello.



3.2.1 Gestore proprietà fisiche

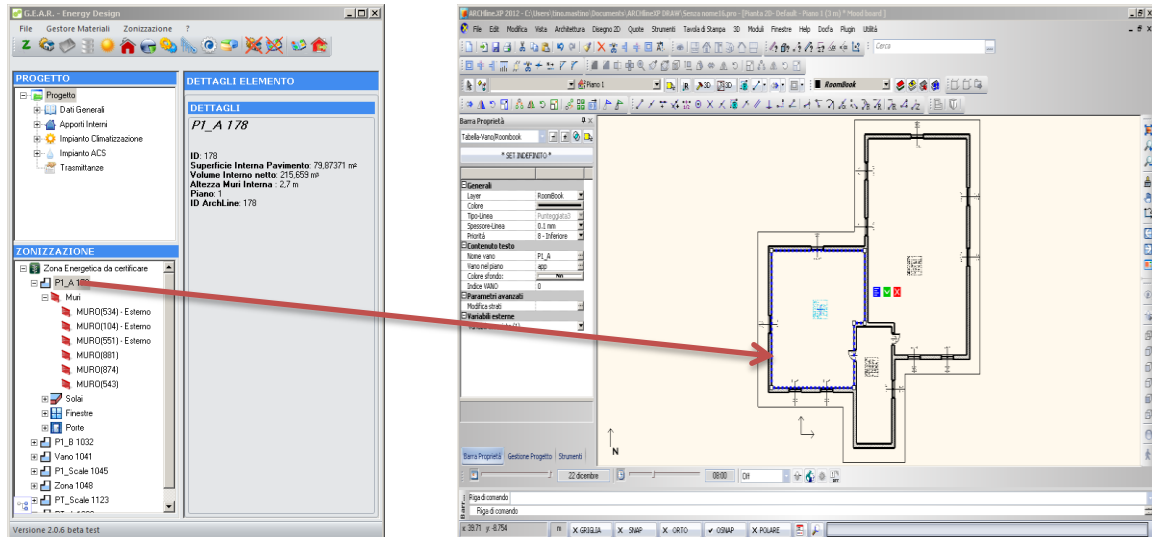
Il gestore proprietà fisiche consente di calcolare o impostare, nel caso siano disponibili dati sperimentali di laboratori, i principali parametri prestazionali dei componenti edilizi. Come si può osservare nell'immagine della schermata prototipo sotto riportata, il componente edilizio può essere gestito sotto i differenti aspetti.

N°	Nome	Tipo	Spessore(mr)	Conducibilità λ	Conduttanza	Densità	CaloreSpec. μ	Permeabilità δ	Permeabilità δ	RigiditàDinai	Ms	a	effusività
1	int termo	1	20	0.1	5.00	900	860	50	50		18.00	0.13	278.21
2	int termo	2	250	0.300	1.2	1200	840	50	50		300.00	0.30	549.91
3	int termo	1	20	0.1	5.00	900	860	50	50		18.00	0.13	278.21
*													

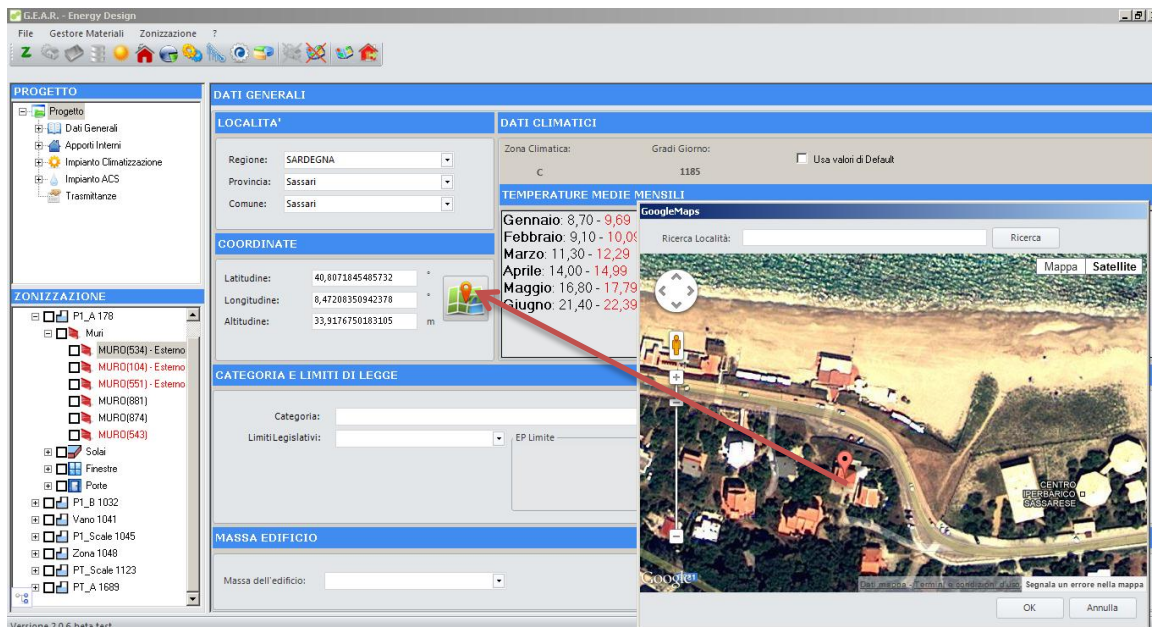
Il gestore delle proprietà fisiche del modello è in grado di gestire differenti problematiche legate alla progettazione del componente; per esempio possono essere gestiti dal punto di vista acustico i sistemi di placcaggio a parete o i controsoffitti per i solai impostando il ΔL (miglioramento dell'isolamento al calpestio) o ΔR (miglioramento del potere fonoisolante) che questi generano; per la parte inerente il calcolo del fattore di luce diurna possono essere assegnati al componente i coefficienti di riflessione superficiale.

3.2.2 Calcolo energetico

L'interfaccia mostra la relazione bidirezionale fra il cad e il modello di calcolo. Si noti come selezionando un roombook all'interno di una zona (in questo caso zona termica) la stessa sia messa in evidenza sul modello tridimensionale. Si noti inoltre che della stessa sono disponibili tutte le informazioni geometriche necessarie per i calcoli.



Il modulo dati climatici, le cui schermate sono di seguito riportate consente lo sfruttamento dei dati geografici provenienti da Google Maps, e in funzione di questi, con le procedure e i metodi previsti dalle norme uni di riferimento (UNI 10349), calcola la variazione dei dati (colore rosso) rispetto ai dati della località più vicina di riferimento (colore nero).



Il modello gestisce completamente la banca dati climatici della località di riferimento, nelle immagine sotto riportata sono visualizzati, per esempio, i dati relativi alle provincie riportanti temperature medie mensili e quota slm.

Proprietà fisiche componenti - G.E.A.R. by G.F.T.A.

Apri Salva Archivio Strutture **Materiali** SASSARI Sigla = SS Sassari Località

Dati Interni 20 °C 65 % U. R. 0.3 m²/h 250 m³ 0.4 kg/h

Trasmittanze Proprietà Fisiche Componente Materiali Glaser fRsi B1 fRsi B2 fRsi B3 fRsi B4 Grafico Dati Climatici T Dati Climatici P Dati Clima Var

Muro1 Muro2

Materiali

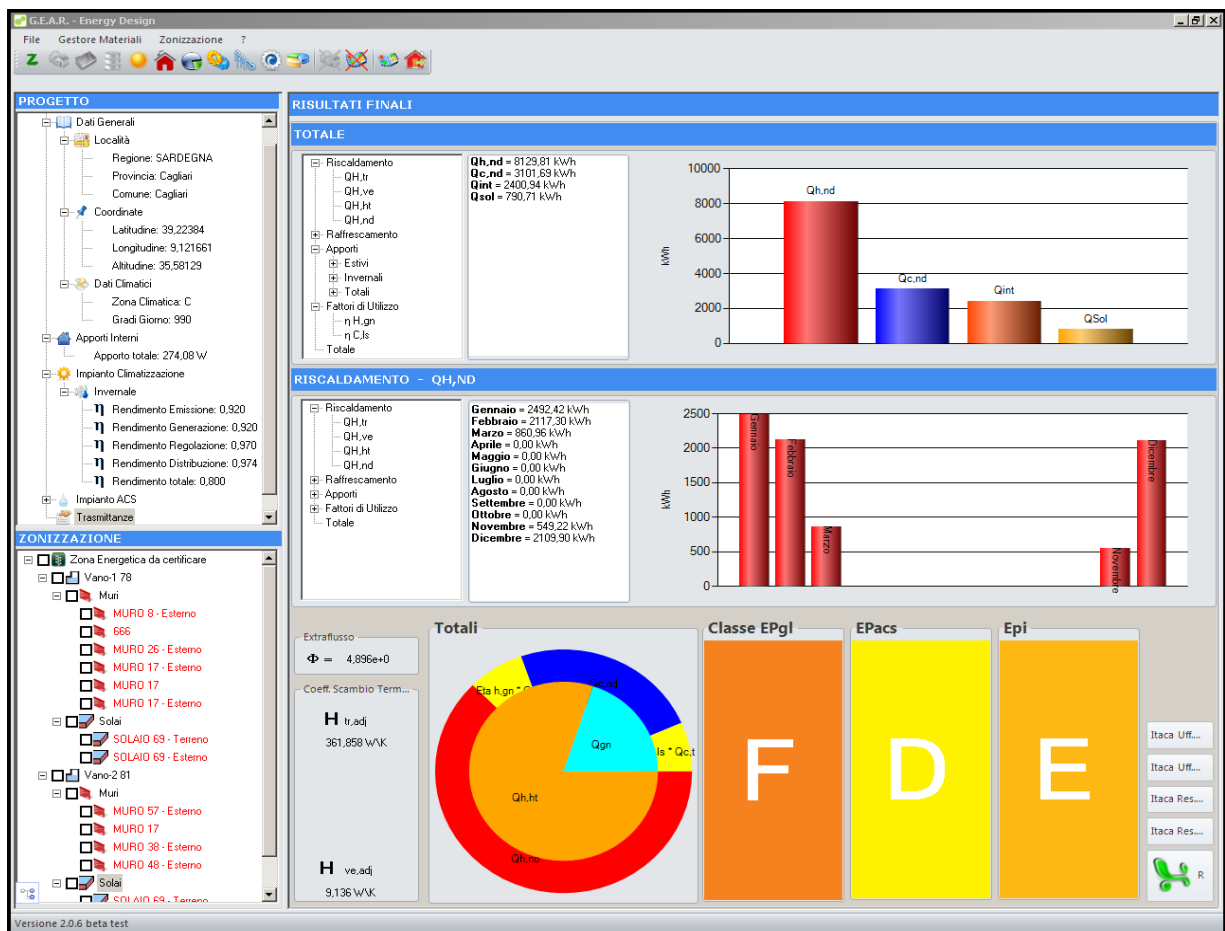
Temperature Medie Provinciali di Riferimento

ID	Sigla Provincia	Località	Altitudine m	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Sett
77	RN	Rimini	5	3.1	4.9	8.5	12.4	16.5	20.8	23.4	22.7	19.9
78	RO	Rovigno	7	1.3	3.6	8.5	13.4	17.6	22	24.5	23.8	20.1
79	SA	Salerno	4	10.4	11.3	13.5	16.5	20.1	23.9	26.5	26.6	24.1
80	SI	Siena	322	4.8	5.7	9.1	12.4	16.3	21	24	23.7	20.2
81	SO	Sondrio	307	0.5	3.3	8.2	12.6	16	20	22.3	21.4	18.1
82	SP	La Spezia	3	6.7	7.3	10.1	13.4	16.7	20.9	23.8	23.7	21.2
83	SR	Siracusa	17	11.3	11.5	13.1	15.4	18.7	23	26.2	26.4	23.9
84	SS	Sassari	225	8.7	9.1	11.3	14	16.8	21.4	24	24.5	22.1
85	SV	Savona	4	6.6	8.5	11.4	14.6	18.1	22.2	24.9	24.6	21.9
86	TA	Taranto	15	9.2	9.7	11.3	14.5	18.5	23	25.9	25.8	23
87	TE	Teramo	265	5.1	5.9	9	12.8	16.8	21.4	24	23.6	20.4
88	TN	Trento	194	4.3	7.3	11.8	16.5	20	24	26.3	25.5	22.3
89	TO	Torino	239	0.4	3.2	8.2	12.7	16.7	21.1	23.3	22.6	18.8
90	TP	Trapani	3	11	11.5	13.2	15.8	19.2	23.3	25.8	26.2	24
91	TR	Terni	130	6.7	7.6	10.7	13.6	17.6	22.3	24.7	24.3	21.1
92	TS	Trieste	2	4.9	6.2	9.4	13.5	17.7	21.9	24.2	24	20.7
93	TV	Treviso	15	2.8	4.4	8.4	13.2	17.1	21.6	23.8	23.2	19.8
94	UD	Udine	113	3.5	5	8.6	13.3	17.3	21.1	23.3	23.1	19.8

N°	Nome	Tipo	Spessore(m)	Conducibilità	Conduzanza	Densità	CaloreSpec.	μ	Permeabilità	Permeabilità	RigiditàDinam.	Ms	a	effusività
1	int termo	1	20	0.1	5.00	900	850	50	50	50		18.00	0.13	278.21
2	int termo	2	250	0.300	1.2	1200	840	50	50	50		300.00	0.30	549.91
3	int termo	1	20	0.1	5.00	900	850	50	50	50		18.00	0.13	278.21

Apri U Salva U Calcola Valori Annulla OK

I metodi e le classi implementate, consentono il calcolo del fabbisogno di energia ideale per l'involucro e il calcolo del fabbisogno di energia primaria per il sistema edificio-impianto considerato. Il tutto secondo quanto previsto dalle norme che rappresentano il recepimento nazionale della norma UNI EN ISO 13790. Come si osserva dall'immagine sottostante, il modello calcola e restituisce tutti i singoli termini delle equazioni che stanno alla base del calcolo. Infatti nell'interfaccia utente prototipo che si è sviluppata sono riportati i fabbisogni ideali mensili di energia ($Q_{H,ht}$), gli apporti solari (Q_{sol}), gli apporti interni (Q_{int}) e i fabbisogni ideali per la climatizzazione estiva ed invernale rispettivamente ($Q_{C,nd}$ e $Q_{H,nd}$).

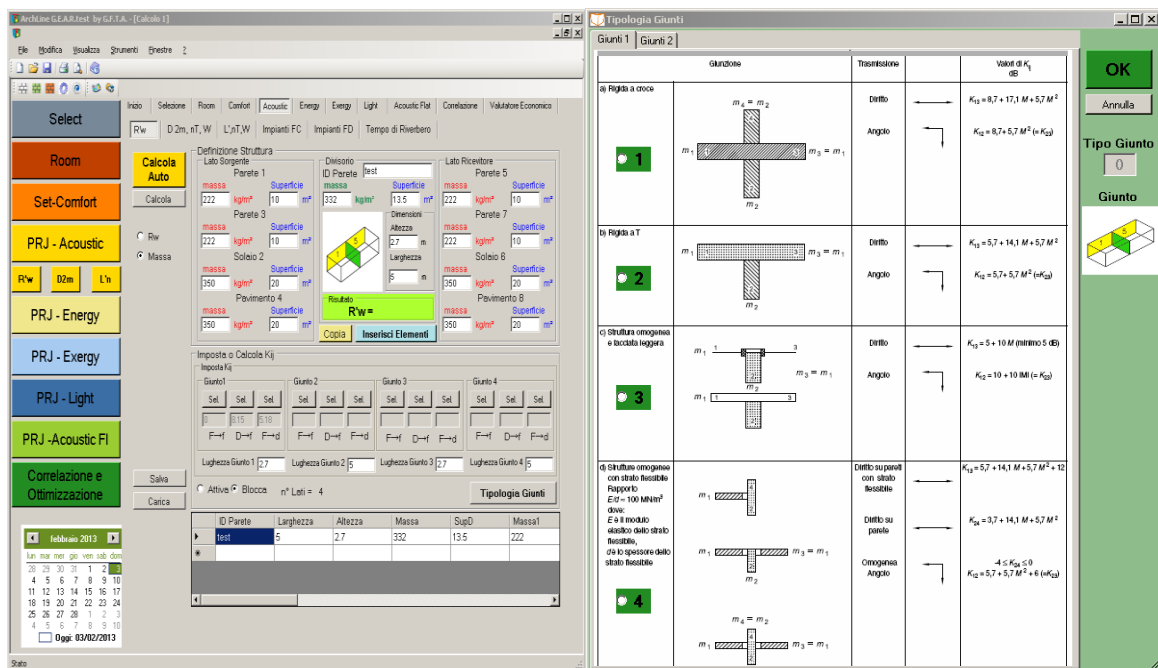


3.2.3 Calcolo Acustico

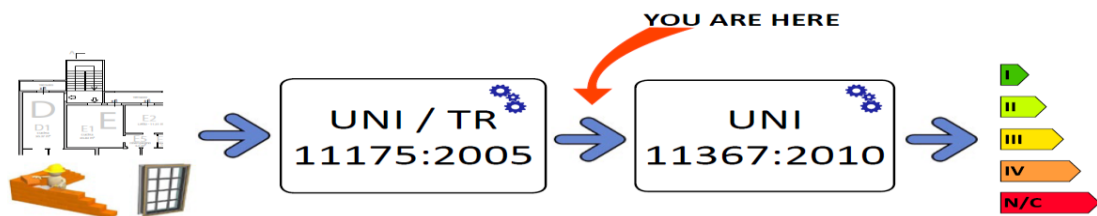
Dal punto di vista acustico, il modello consente il calcolo previsionale dei requisiti acustici passivi secondo le procedure previste dalle norme UNI EN 12354 e UNI TR11175.

Per i differenti componenti che possono essere presenti nel calcolo, il modello consente di stimare l'indice del potere fonoisolante o il potere fonoisolante inserendo la stratigrafia del componente e applicando le varie formule presenti nelle norme UNI di riferimento o all'interno delle pubblicazioni scientifiche che trattano tale argomento e che sono state oggetto di analisi nella presente ricerca. Nel caso in cui per il componente siano presenti dati sperimentali, a singolo indice o in frequenza, è possibile inserire questi come valori da utilizzare per il calcolo. Se per esempio si inseriscono i dati in frequenza del poter fonoisolante R , per un dato sistema costruttivo, misurati in laboratorio, e si volesse eseguire il calcolo semplificato che prevede gli indici di valutazione, un metodo basato sulle UNI 717 provvede a calcolare e restituire l'indice di valutazione R_w usato nella procedura semplificata.

Il modello consente di calcolare in via previsionale gli indicatori che esprimono i requisiti acustici passivi confrontandone il risultato con gli indici di prestazione fissati dal DPCM 5/12/97. Nelle diverse schermate prototipo sviluppate è possibile inputare tutte quelle informazioni necessarie per i calcoli dei differenti indici. Per esempio nell'immagine sotto riportata, dove è evidenziato l'input dati per il calcolo del potere fonoisolante, si può notare sulla destra la scelta della tipologia di giunto ai fini del calcolo della componente K_{ij} .



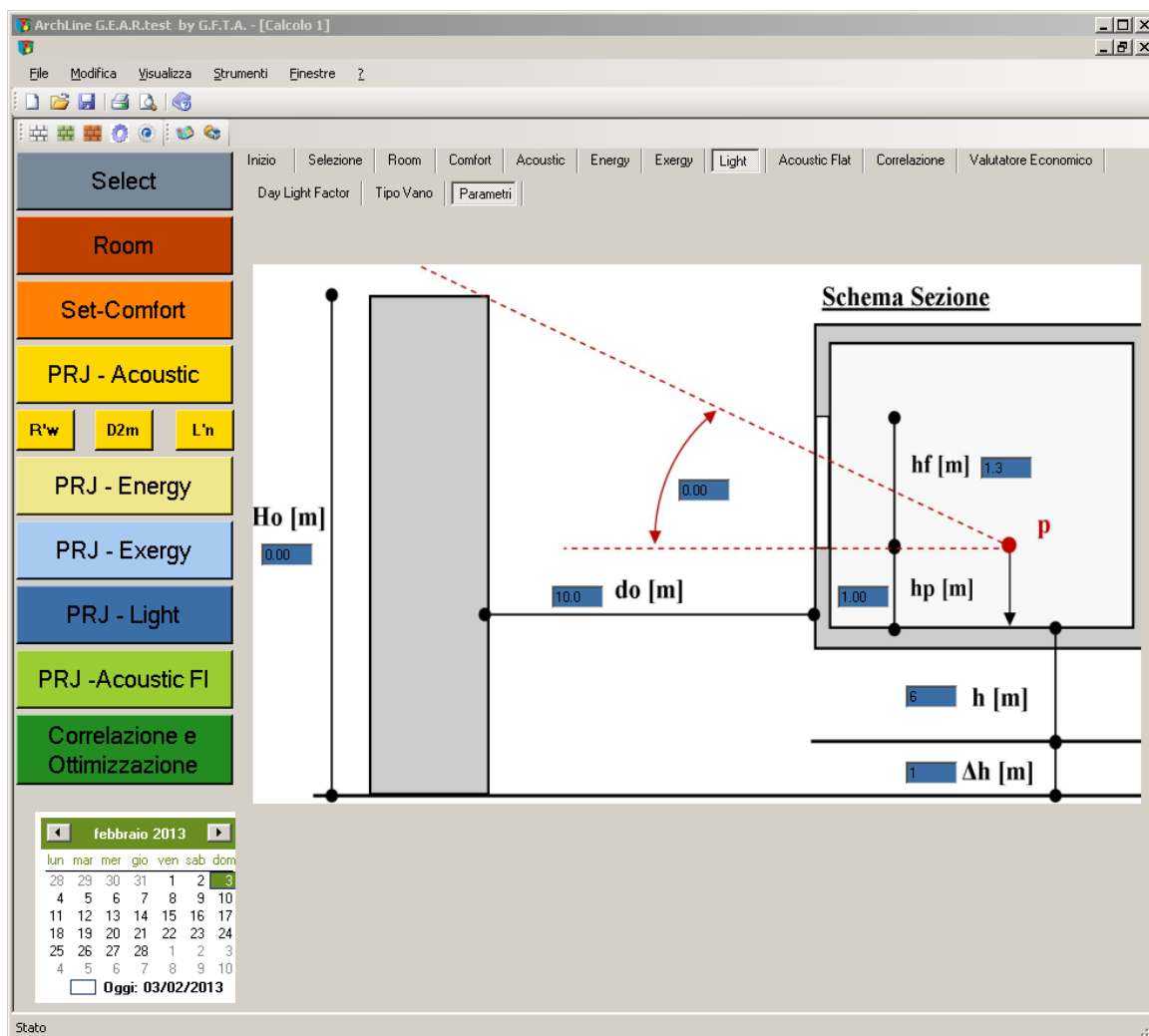
Il modello consente inoltre, sfruttando le procedure delle norme UNI 11367 e 11444, di effettuare, una volta concluso il calcolo previsionale, la classificazione acustica "previsionale" dell'unità immobiliare (zona acustica) considerata.



3.2.4 Calcolo del fattore di luce diurna

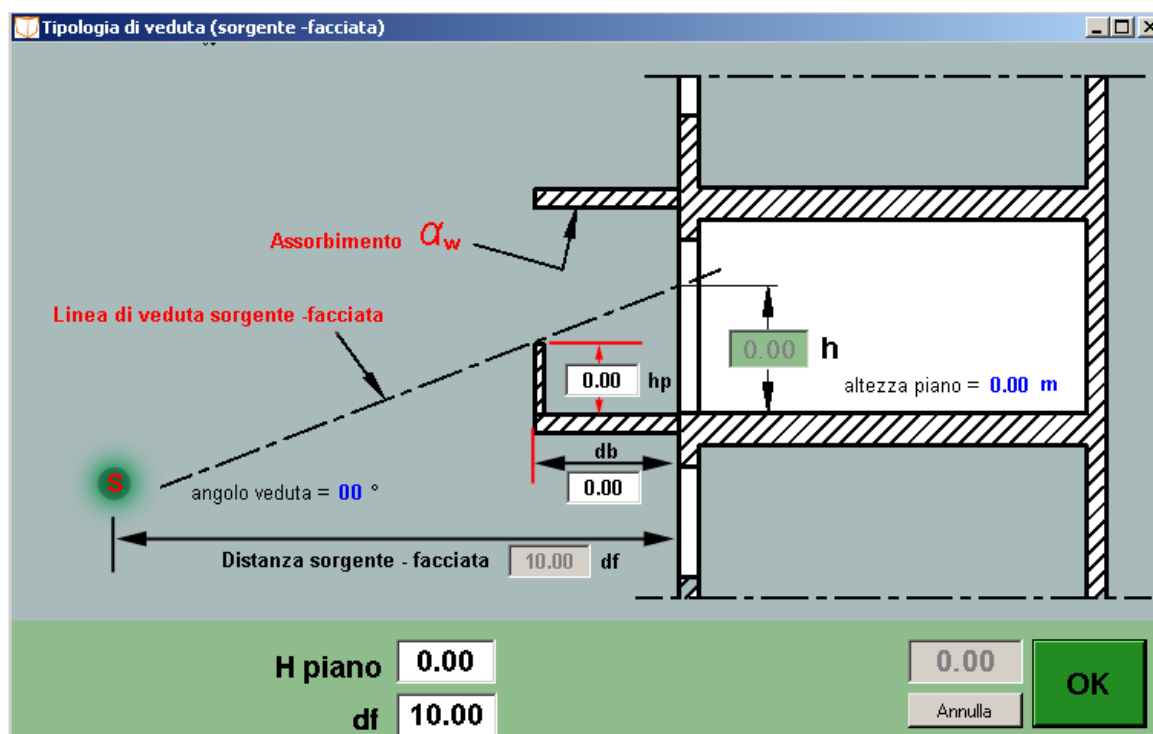
Un'altra caratteristica del modello sviluppato è il calcolo del fattore di luce diurna (day light factor). Nel calcolo il modello utilizza le tabelle di luminanza del cielo Standard e cielo Internazionale. Il calcolo è eseguito dividendo la superficie di riferimento all'interno dell'ambiente considerato, con una maglia ortogonale. Il passo della predetta maglia, che determina il numero di punti di calcolo, può essere impostato dall'operatore.

I valori di riferimento per valutare i risultati del calcolo, sono stati attribuiti, in funzione della destinazione d'uso, secondo i dettami legislativi di riferimento e, in mancanza di questi, secondo quanto riportato nei principali testi di illuminotecnica citati in bibliografia. Si riporta di seguito, la schermata dell'interfaccia prototipo sviluppata, dove è richiesto l'impostazione delle informazioni su eventuali ostruzioni esterne presenti.



3.3 Dati necessari per i calcoli

Per poter funzionare il modello ha necessità di avere a disposizione tutta una serie di dati iniziali differenti per tipologia e scopo. Per esempio per il calcolo energetico sarà indispensabile la banca dati sul clima, mentre per il calcolo acustico sono fondamentali i dati sui sistemi costruttivi usati. Altri dati in ingresso che serve fornire al codice di calcolo sono i dati geometrici riportanti superfici, volumi, lunghezze etc. Questi se l'edificio è piuttosto corposo, come ad esempio una palazzina di 5 piani, rappresentano, a causa del numero elevato di elementi, un grosso impegno per l'operatore. Il modello sviluppato grazie all'interfacciamento con il cad architettonico riesce a recuperare tutte le principali informazioni geometriche necessarie per eseguire tutti calcoli. Tuttavia alcune informazioni, come quelle inerenti la forma della facciata, necessarie per il calcolo previsionale dell'isolamento acustico, devono essere inserite manualmente (si riporta qui di seguito la schermata prototipo di input).



Altri dati fondamentali per i calcoli sono le proprietà fisiche dei materiali e dei sistemi costruttivi usati. A tale scopo il modello carica in fase di avvio una banca dati che può essere aggiornata, riportante le caratteristiche di numerosi materiali. Se si dispone di dati sperimentali è possibile imputare al modello tali dati. Oltre a quanto su descritto, il codice di calcolo, richiede di indicare i vari parametri che livello legislativo, normativo, o

prestazionale è necessario raggiungere o rispettare. Per esempio per il calcolo della prestazione energetica di un ipotetico edificio sarà necessario indicare località, e destinazione d'uso delle differenti zone. I dati richiesti, comuni a differenti problematiche, dovranno essere inputati una sola volta. Per esempio se si decidesse di eseguire dei calcoli previsionali partendo dall'aspetto "energetico" la destinazione d'uso dei vani una volta impostata sarà utilizzata anche per i calcolo previsionale dei requisiti acustici passivi e per il fattore di luce diurna.

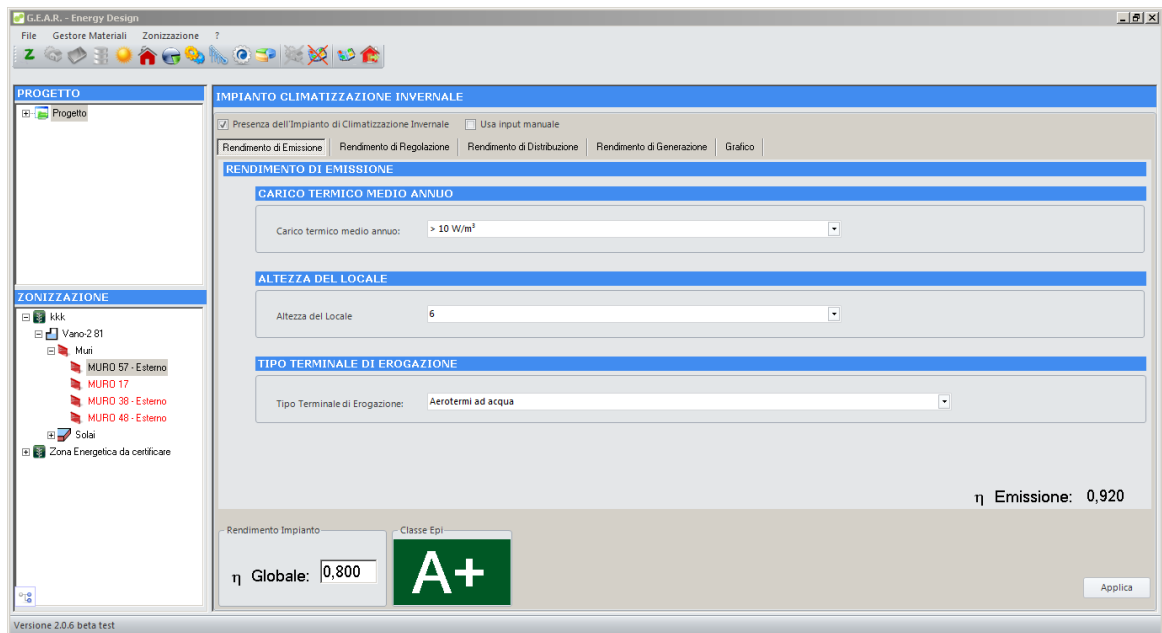
3.4 Risultati ottenibili dal modello

Il codice sviluppato, di cui di seguito si riportano delle interfacce prototipo create allo scopo di testare il modello, consente di ottenere i seguenti risultati:

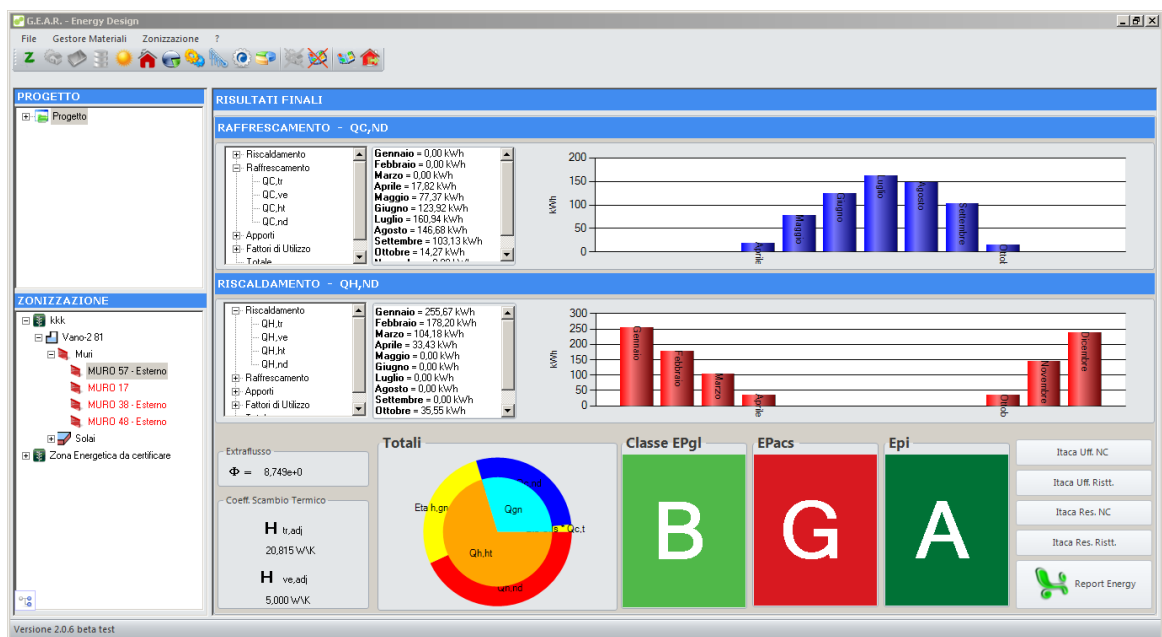
- Indicatori della prestazione energetica del o dei sistemi edificio impianto considerati, nel rispetto delle attuali procedure normative previste per legge e verifiche dei rispettivi limiti di legge. Si riportano di seguito le differenti schermate che mostrano l'input dati e i relativi risultati parziali riferiti al solo involucro, all'impianto e al sistema edificio-impianto complessivo.



Risultati sulla prestanza del solo involucro edilizio

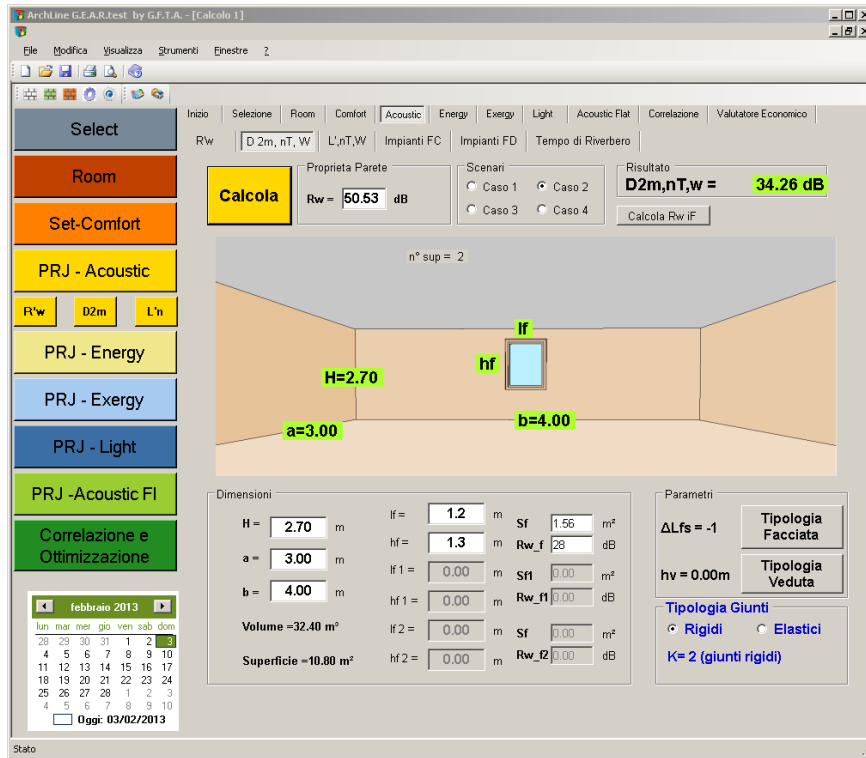


Schermata di input e valutazione caratteristiche standard dell'impianto

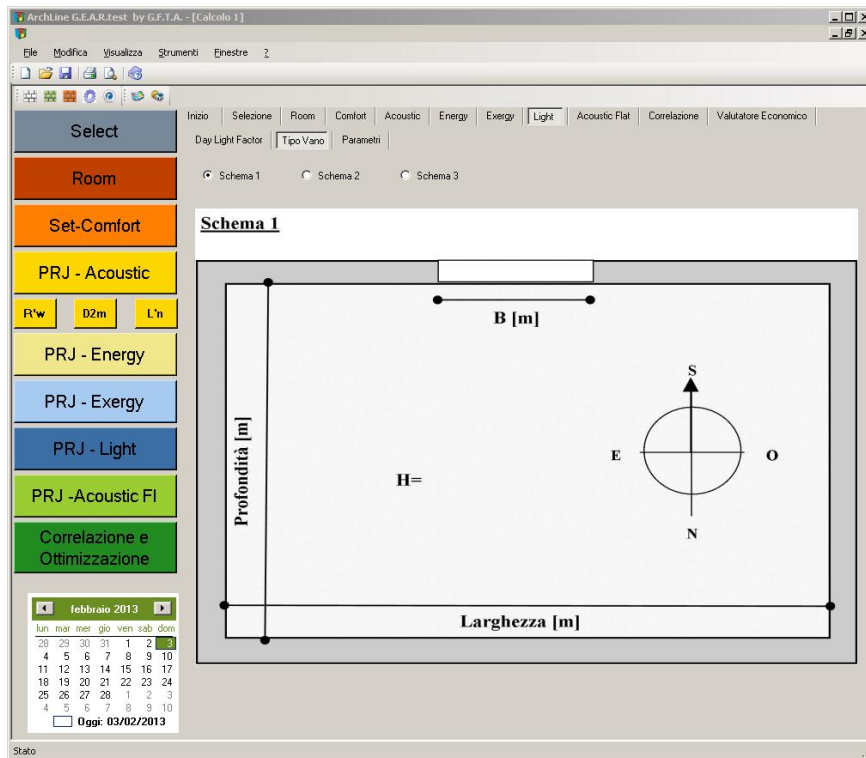


Schermata risultati complessiva del sistema edificio impianto

- indicatori delle prestazioni acustica passive degli edifici per le singole zone definite, in funzione della destinazione d'uso indicata.



- Fattore di luce diurna dei singoli vani in funzione dell'esposizione del vano, della destinazione d'uso.



3.5 Caratteri innovativi del modello

L'innovatività del modello sviluppato sta nella trattazione unica di più problematiche fisiche il tutto integrato nel cad architettonico tridimensionale. Per trattare tali problematiche, il modello di calcolo non necessita di una modellazione geometrica tridimensionale realizzata ad hoc, bensì può utilizzare lo stesso modello geometrico prodotto per il progetto architettonico. Oltre a questo una delle funzioni più innovative è dovuta alla parzializzazione dinamica delle superfici. Questa grazie al fatto che i calcoli si basano su un modello tridimensionale, consente in fase di progetto di eseguire un numero molto maggiore di simulazioni per trovare la configurazione ideale per quel dato sistema.

4 Conclusioni.

A seguito della ricerca svolta nel triennio, sentito il parere della cadline software e analizzando i dati ottenuti dai test effettuati si può affermare che i risultati del modello sviluppato sono in linea con i valori ottenuti da altri modelli che trattano le singole problematiche.

La strutturazione del modello è stata tale che lo stesso potrà essere implementato con ulteriori differenti interfacce, quale ad esempio per l'utilizzo del motore di calcolo Energy Plus.

La cadline software srl, ha infine annunciato che il modello di calcolo GEAR sarà integrato all'interno del proprio Software tecnico professionale, il quale sarà distribuito su tutto il territorio nazionale.

5 Bibliografia, pubblicazioni, norme unificate di riferimento e webgrafia

5.1 Bibliografia

- B1. Room Acoustics, Heinrich Kuttruff, Fifth Edition, 2009;
- B2. Assorbimento e isolamento acustico negli edifici, Claudio Martorana Simona Becherini, Maggioli Editore, Maggio 2006;(collocazione A03 1433)
- B3. Acustica Edilizia, A. Berlincioni Antonio Agostino Capocaccia, Centro acustico nazionale, 1958; (collocazione D/III/301)
- B4. Acustica ambientale, a cura di Legislazione Tecnica, Legislazione Tecnica editrice, (collocazione L514)
- B5. Il manuale delle pareti in elementi forati di laterizio, M. Chiara Torricelli, Edizioni latterservice;
- B6. Elementi di acustica tecnica, R. Lazzarin M. Strada, CLEUP s.c.a.r.l. editore, Gennaio 2001;
- B7. Guida alle tecniche di costruzione, Vari, Gruppo Editoriale Esselibri-Simone, Settembre 2006;
- B8. Isolamento Acustico in Edilizia, Franco Bertellino Enrico Natalini, Dario Flacovio Editore, gennaio 2006;
- B9. Progettare il Silenzio, Anna Magrini, EPC Libri Editore, 2005;
- B10. Il Nuova Manuale Europeo di Bioarchitettura, Ugo Sasso, Gruppo Mancosu Editore, 2007;
- B11. Acustica Musicale e Architettonica, Vari, U.T.E.T. Editore, (collocazione D/III/2738);
- B12. La certificazione e l'efficienza energetica del sistema edificio-impianto, AICARR, Fonte Grafica editore, maggio 2006;
- B13. Guida al controllo energetico della progettazione, CNR ed ENEA,PEG Editrice Milano, Roma dicembre 1985;
- B14. Simulazione oraria del comportamento termico energetico degli edifici, CNR ed ENEA,PEG Editrice Milano, Roma dicembre 1982;
- B15. C# Guida alla programmazione di base e all'ambiente di sviluppo, Michele De Benedittis, Hoepli Milano Editore, 2007;

- B16. Fondamenti di C++, Herbert Schildt, McGraw Hill editore, Milano 2004;
- B17. Trasmissione del calore, Italo Barducci, E.S.A. Edizioni, 1981;
- B18. Fondamenti di trasmissione del calore, R. Mastrullo P. Mazzei V. Naso R. Vanoli, Liguori Editore, 1988;
- B19. Certificazione Energetica di edifici e impianti termici, Vincenzo Latanzi Renato Soragnese, Legislazione Tecnica editrice, ottobre 2007;
- B20. Illuminotecnica, G. Moncada Lo Giudice – A de Lieto Vollaro, Casa editrice Ambrosiana, 1999;
- B21. Analisi exergetica, Andrea Galliani – Ernesto Pedrocchi, Polipres, 2008;

5.2 Principali pubblicazioni scientifiche di riferimento

- P1. **Proposal for a referece floor for hollow brick and concrete slabs based on Italian experiences** – Antonino Di Bella, Alessandro Schiavi, Giovanni Semprini, Arianna Astolfi – Rivista Italiana di acustica, volume 35,N.1 – 2011;
- P2. **Thermodynamic analysis of a building using exergy analysis method** - Authors: Cem Tahsin Yucer, Arif Hepbasli - Accepted date: 18-10-2010
- P3. **Building information model based energy/exergy performance assessment in early design stages** - Authors: Arno Schlueter, Frank Thesseling - Accepted 12 July 2008
- P4. **Methodology to estimate building energy consumption using EnergyPlus Benchmark Models** - Authors: Nelson Fumo, Pedro Mago, Rogelio Luck - Accepted date: 23-07-2010
- P5. **Building envelope regulations on thermal comfort in glass facade buildings and energy-saving potential for PMV-based comfort control** - Authors: Ruey-Lung Hwang, Shiu-Ya Shu - Accepted: 9 October 2010
- P6. **Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN15251** - Authors: Fergus Nicol , Michael Humphreys - Accepted: 29 December 2008
- P7. **Heating and Cooling with Focus on Increased Energy Efficiency and Improved Comfort, Guidebook to IEA ECBCS Annex 37, Low Exergy Systems for Heating and Cooling of Buildings** - Authors: vari – Anno: settembre 2004

P8. ECBCS Annex 49 Low Exergy system for High-Performance Building and Communities.

5.3 Norme unificate di riferimento

- N1. UNI EN 12354
- N2. UNI TR 11175
- N3. UNI EN ISO 13790
- N4. UNI EN 13788
- N5. UNI EN ISO 6946
- N6. UNI 10351
- N7. UNI 10355
- N8. UNI 410
- N9. UNI EN ISO 13786
- N10. UNI EN ISO 7730
- N11. UNI TS 11300

5.4 Webgrafia

- W1. <http://www.associazioneitalianadiacustica.it>
- W2. <http://www.aicarr.it/>
- W3. <http://www.acta-acustica-united-with-acustica.com/>
- W4. <http://www.acusticaedilizia.it>
- W5. <http://www.rockwool.it>
- W6. <http://www.anit.it>
- W7. <http://www.assoacustici.it>
- W8. <http://www.01db.it>
- W9. <http://spectra.it>
- W10. <http://www.scs-controlsys.com>