

Il disturbo alla collettività: previsione e misura

G.M.Amadasi – G.Mossa - S.C.S. Controlli e Sistemi S.r.l. – Padova
C.Notini – 01dB Italia S.r.l. – Padova

introduzione

Il problema del disturbo alla collettività è sicuramente diventato uno dei temi fondamentali della vita di oggi e l'approccio empiristico delle varie problematiche ad esse inerenti non è più accettabile, se pure lo fosse stato in passato.

Ad esempio sono sicuramente da scartare oggi pseudo-soluzioni come le barriere di alberi o il rivestimento con materiali fonoassorbenti di pareti in cemento armato o mattoni, in quanto entrambe sono sicuramente inefficaci, rispettivamente, per schermare il rumore di una strada o ridurre il rumore del vicinato.

Una solida esperienza da parte dei tecnici incaricati è una base fondamentale ma l'utilizzo di moderni sistemi di misura e di strumenti software predittivi è altrettanto necessario se non indispensabile in molte situazioni.

Nella presente memoria saranno affrontati alcuni aspetti di questo problema: dall'utilizzo di modelli previsionali per studiare un nuovo insediamento o verificare gli interventi prima della realizzazione, alla metodologia di misura e la scelta dei parametri "veramente" significativi, all'analisi delle vibrazioni, genesi della maggior parte dei fenomeni acustici.

utilizzo di modelli previsionali:

Per modello previsionale si intende lo studio preventivo di una situazione "presente o futura" con mezzi informatici che utilizzano dei codici di calcolo e permettono di simulare un sito geografico, una struttura, un componente, e via dicendo.

Esistono diversi approcci scientifici specificatamente dedicati a risolvere una determinata problematica e dei codici di calcolo da essi derivanti che "non sono

onnipotenti”, cioè applicabili a tutto lo scibile del campo acustico e vibrazionale. In realtà sarebbe necessario scegliere l’approccio più corretto in funzione del problema da risolvere, o per lo meno verificare quale potrebbe essere il compromesso migliore da accettare. In ogni caso è sempre consigliabile usare una certa dose di buon senso e “semplificare” il problema suddividendolo o riducendolo all’essenziale, una buona approssimazione significa ottenere un risultato del quale si è sicuri del grado di incertezza.

Suddividendo in interno ed esterno la casistica del disturbo da rumore alla collettività si rende necessario l’utilizzo di due diversi approcci scientifici: un approccio dedicato all’interazione del suono con le strutture per il problema interno, ed un approccio sulla propagazione del suono per il problema esterno.

il disturbo all’interno degli edifici

Le sorgenti sonore di un locale di intrattenimento con musica sono rappresentate principalmente dai diffusori acustici ma non vanno però escluse a priori altre fonti quali i colloqui del pubblico e le attività di servizio interne come ad esempio la manipolazione ed il lavaggio di stoviglie, la preparazione e la rimozione dei rifiuti, ecc.

La costruzione di un modello previsionale non può essere fatta se non accettando una serie di approssimazioni sempre che si voglia essere realistico-pratici e non fare della pura accademia. Ad esempio risulta necessario fare una serie di ipotesi iniziali che riguardano:

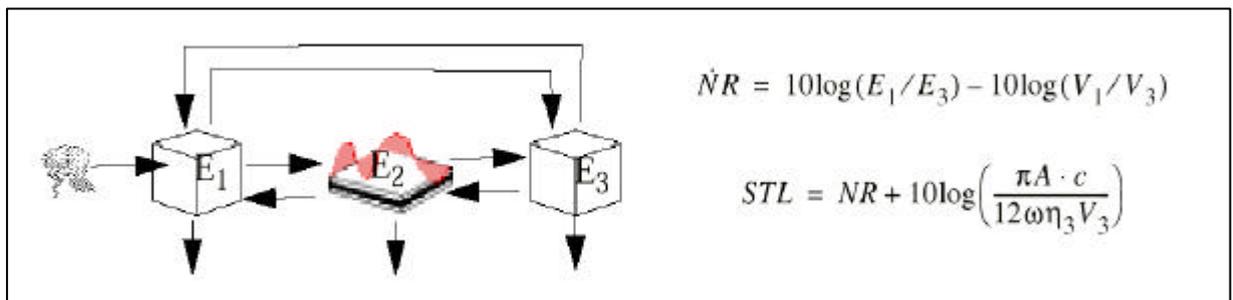
- una geometria 3d semplificata dell’immobile,
- l’elencazione delle sorgenti da considerare,
- la potenza acustica che potrà essere generata da ognuna di esse,
- le vie di propagazione aerea e solida che si vogliono considerare nel modello,
- i punti ricettori sui quali stimare il livello di pressione sonora,
-

il modello da applicare

L’interazione del suono con le strutture è un argomento di ingegneria supportato da una vasta bibliografia e da dati sperimentali, sia in termini di isolamento acustico che di assorbimento acustico, la questione però è sul come scrivere le equazioni che governano questa materia su strutture complesse, e come

utilizzare correttamente i dati sulle caratteristiche acustiche dei materiali utilizzati. Ad esempio, in una prova di laboratorio del potere fonoisolante di un pannello divisorio, si cercano di minimizzare tutti gli effetti al contorno come le “trasmissioni laterali”, che invece sono forzatamente presenti nelle situazioni reali.

Non appena si comincia a scrivere una formulazione che tenga conto di tutte le situazioni al contorno, si finisce col ritrovarsi un sistema di equazioni strettamente correlate e non facilmente risolvibili se non con metodi iterativi, sicuramente lunghi e laboriosi, e che non possono garantire di trovare una soluzione, visto che le variabili in gioco da tenere sotto controllo non sono certo poche.



Un metodo particolarmente interessante, e che si sta sempre più imponendo per la sua validità e soprattutto “rapidità” nell’ottenere i risultati, come strumento di modellazione acustica, si basa sul concetto di analisi energetica su base statistica (SEA - Statistical Energy Analysis), ad esempio per calcolare la perdita di trasmissione (TL – Transmission Loss) di pareti e strutture, necessaria per ottenere una determinata riduzione del rumore (NR – Noise Reduction) in strutture finite. La metodologia SEA può essere applicata a tutti i campi della meccanica, delle costruzioni civili, per i mezzi di trasporto, nell’acustica subacquea, ecc.

Un modello SEA di 2 cavità acustiche separate da una parete con caratteristiche elastiche risonanti è rappresentato dallo schema in figura. Nel caso della TL e/o NR il SEA prevede di risolvere un problema vibroacustico di bilancio energetico (bilancio di potenza), tra due cavità acustiche separate da una parete; così come descritto da vari autori e rappresentabile da un modello la cui soluzione (matrice di bilancio di potenza), per il caso di una parete singola, ha la forma seguente:

la soluzione della matrice comporta il raggiungimento dell’equilibrio energetico tra i livelli di vibrazione strutturale e di pressione sonora.

$$\omega \begin{bmatrix} (\eta_1 + \eta_{12} + \eta_{13}) & -\eta_{21} & -\eta_{31} \\ -\eta_{12} & (\eta_2 + \eta_{21} + \eta_{23}) & -\eta_{32} \\ -\eta_{13} & -\eta_{23} & (\eta_3 + \eta_{31} + \eta_{32}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Pi_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Il modello semplice sopra rappresentato può essere ampliato per pareti multistrato o per strutture complesse con interconnessioni. Ogni sottosistema aggiunto viene convenientemente connesso agli altri tenendo in considerazione la tipologia di giunzione strutturale e l'accoppiamento fluido-struttura.

Fattore di accoppiamento per la radiazione modale

Il fattore di accoppiamento (Modal Radiation Coupling Loss Factor) ζ_{sa} è proporzionale all'efficienza di radiazione $\tilde{\eta}_{rad}$:

$$\eta_{sa} = \frac{\rho c}{\omega \hat{m}} \cdot \sigma_{rad}$$

in cui ρc rappresenta l'impedenza acustica e m la densità superficiale della struttura.

Modelli di calcolo dell'efficienza di radiazione per piastre isotropiche semplici sono disponibili in bibliografia, mentre per materiali ortotropici o stratificati si può utilizzare un approccio di altro tipo. Per il caso di un pannello sandwich che ha le proprietà superficiali E_s , t_s , e quelle interne G_c , t_c , si ha un'equazione per modi in frequenza discreti del tipo:

$$\omega_{m,n} = (k_m^2 + k_n^2) \cdot \sqrt{\left(\frac{E_s t_s^2}{6\hat{m}} + \frac{E_s t_s (t_s + t_c)^2}{2\hat{m}} \left(\frac{2G_c t_c}{(2G_c t_c + E_s t_s (t_s + t_c)^2 (k_m^2 + k_n^2))} \right) \right)}$$

Per ogni modo di vibrazione $\omega_{m,n}$ con componenti (numero d'onda) k_m , k_n , che risuona nella banda di frequenza di analisi, è possibile stimare l'efficienza di

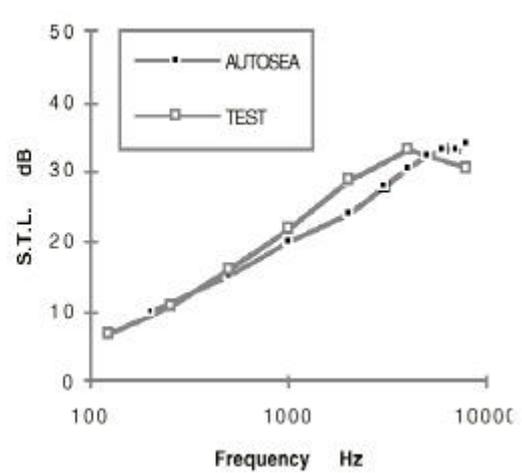
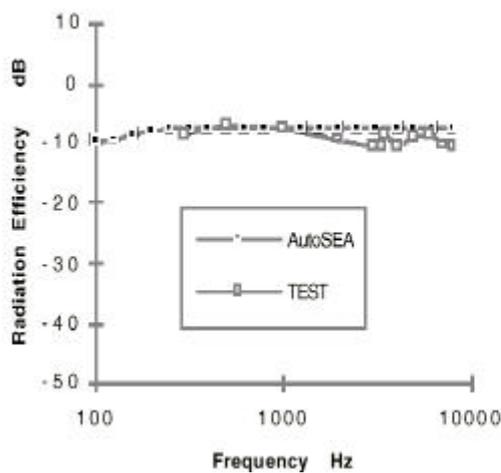
radiazione dal criterio di accettabilità modale j mediato in banda di frequenza (joint acceptance).

$$\sigma_{rad} = \frac{Ak^2}{2\pi} \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{\omega_{m,n} \in \Delta\omega} j_{m,n}^2$$

$$j_{m,n}^2 = \frac{1}{A^2} \cdot \iint_{AA} \sin(k_m x) \sin(k_n y) \cdot \frac{\sin(k \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2})}{k \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}} \cdot \sin(k_m x') \sin(k_n y') dA dA$$

questo metodo consente di distinguere tra i modi acustici di struttura “veloci” che sono radiatori efficaci, da quelli “lenti” che presentano uno scarso accoppiamento al campo acustico (fluido).

Un esempio di applicazione è relativo ad un pannello di alluminio con struttura alveolare interna, per il quale erano stati calcolati e poi verificati sperimentalmente i valori di efficienza di radiazione e di STL (Sound Transmission Loss).



Applicazione di materiali su strutture esistenti

Uno o più strati di materiali applicati su strutture esistenti (*Trimming*), per motivi acustici, termici o estetici, sono considerati dalla tecnica SEA a reazione locale, cioè non risonanti e quindi caratterizzati in termini di “trasmissione di potenza” e “fattori di assorbimento”.

Il fattore di accoppiamento fluido-struttura per i modi strutturali risonanti, è in effetti attenuato dall'applicazione di questi materiali (trim layer):

$$\eta_{sa} = \frac{\rho c}{\omega \hat{m}} \cdot \sigma_{rad} \cdot 10^{-(IL_t)/10}$$

per i quali la perdita di inserzione (IL – Insertion Loss) è definita come:

$$IL_t = 10 \cdot \text{Log}_{10} \left(\frac{\Pi^{rad}_{UNTRIMMED}}{\Pi^{rad}_{TRIMMED}} \right)$$

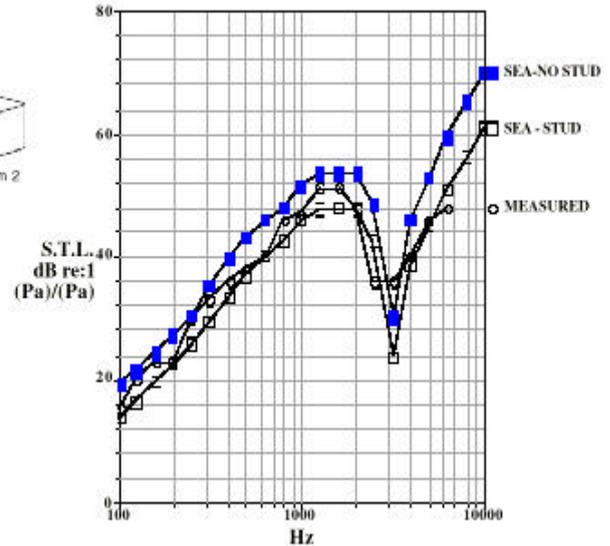
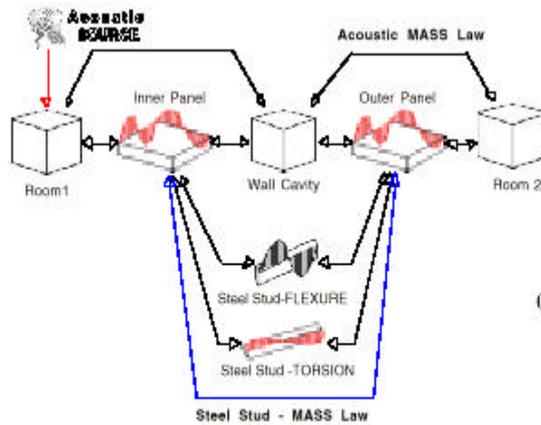
La perdita di inserzione IL per i materiali di rivestimento non-strutturali, a reazione locale, può essere calcolata con la tecnica di impedenza di Byrne, nel presupposto di un pannello con estensione infinita, introducendo però la massa addizionale del materiale nel connettore non-risonante (legge di massa) ζ_{13} tra i due sottosistemi del modello illustrato precedentemente. Questo può essere fatto aggiungendo la densità superficiale del materiale a quella della struttura.

$$\eta_{13} = \frac{1}{\omega n_1} \cdot \left[\frac{2\rho c}{\omega(m_{struct} + \hat{m}_{trim})} \right]^2$$

Trasmissioni laterali

Un vantaggio essenziale della tecnica SEA è quello di funzionare con sottosistemi discreti, corrispondenti a componenti strutturali con un comportamento fortemente risonante, che consente di modellare anche altre “vie di propagazione” strutturali (come quelle laterali). Queste connessioni (corto circuiti) vanno a diminuire l'efficacia reale di fonoisolamento (TL) e possono essere introdotte nel modello SEA come sottosistemi energetici oppure come flussi di potenza.

Come esempio prendiamo una parete doppia con intercapedine, collegata con viti di fissaggio (steel stud) e costruiamone il modello che tenga in considerazione la realtà costruttiva, calcolandone il degrado della STL causato dai collegamenti.



Modello previsionale con il metodo SEA

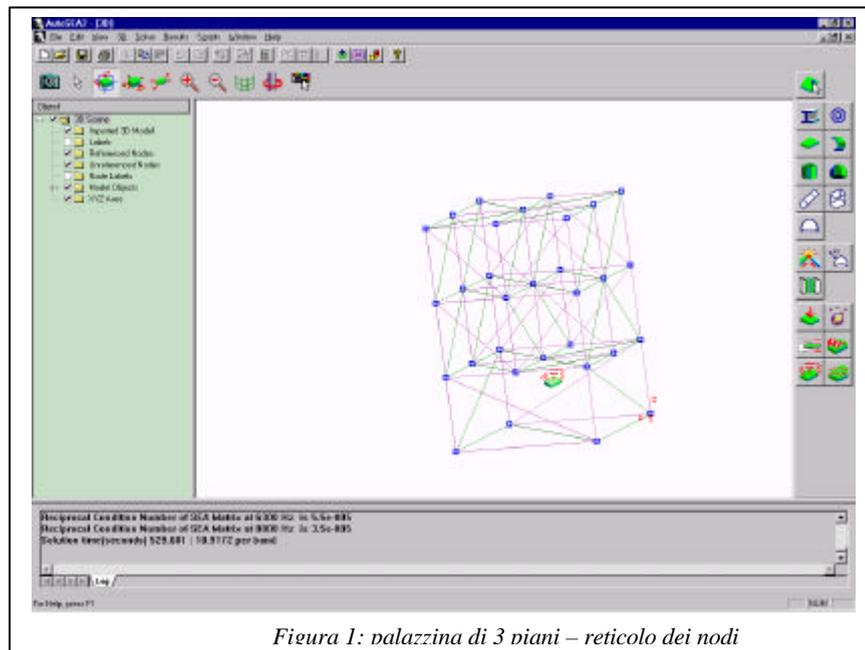
Diversi possono risultare i parametri da utilizzare, nel caso di situazioni esistenti di locali ricavati in un immobile residenziale oppure di immobili a se stanti ma inseriti in un'area residenziale, si potrà partire ad esempio da una serie di misurazioni acustiche e vibrazionali e "modellare" in maniera anche molto approssimata, visto che l'obiettivo potrà essere solo quello di contenere le emissioni verso i confinanti.

Nel caso invece di nuove realizzazioni sarà necessario sviluppare dei modelli più accurati e accettare un certo grado di stima sulla potenza acustica delle sorgenti, ad esempio estrapolando i dati da altre situazioni note.

Vediamo ora la costruzione di un modello semplificato per il caso di un locale ricavato in un condominio. Una palazzina di 3 piani con una unità immobiliare per piano può inizialmente essere schematizzata come l'insieme di 9 cavità acustiche delimitate da pareti piane: una cavità intera al piano terreno e 4 cavità (camere) per il primo e il secondo piano, come rappresentato in Figura.

Il locale di intrattenimento è ubicato al piano terra e vediamo di calcolare il livello di pressione sonora che si andrà a creare nelle varie stanze a partire dalla potenza acustica generata dai diffusori al piano terreno.

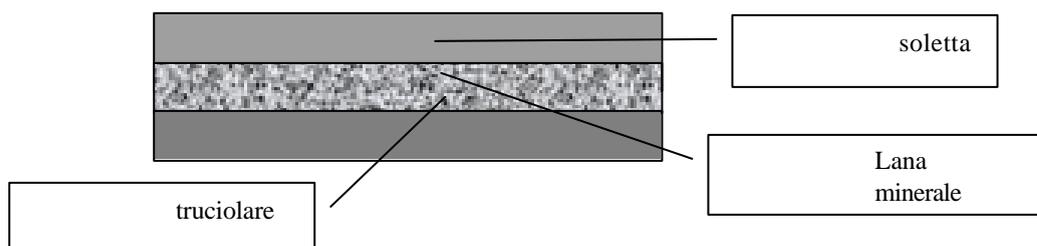
La struttura dell'edificio è realizzata in pannelli prefabbricati di cemento armato con solette da 20cm, isolamento termico nei muri perimetrali esterni da 25cm complessivi, pannelli prefabbricati semplici per le divisioni interne da 10cm.



Immettendo una sorgente sonora in grado di erogare 1 Pa (94 dB) nel locale di intrattenimento al piano terra (locale sorgente) si ottengono nelle stanze al 1° e al 2° piano i Livelli di Pressione Sonora del grafico seguente, dal quale si potrà notare come esista una differenza di “pochi” dB tra i livelli del primo piano e quelli del secondo piano.

Le curve tracciate sono “ponderate” in scala A per avere una visione più immediata del possibile disturbo, fino a quando si continuerà ad adottare la scala A quale indice di valutazione del disturbo, nonostante che altri parametri siano da tempo disponibili.

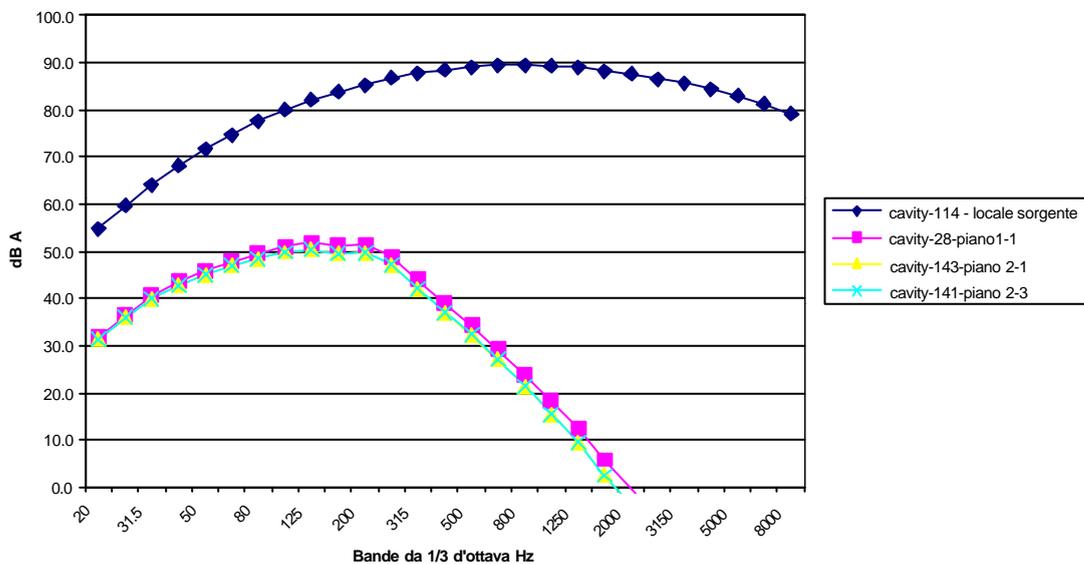
Il livello sonoro nelle stanze del 1° piano (ca 60 dBA) è evidentemente eccessivo ed è dunque necessario definire degli interventi di riduzione. Un primo intervento, largamente adottato in pratica, potrebbe essere quello di realizzare un controsoffitto fonoisolante per aumentare l'isolamento acustico della soletta, costituito da un pannello di truciolare da ben 7cm ed un intercapedine di 8 cm di lana minerale da 50 Kg/mc.



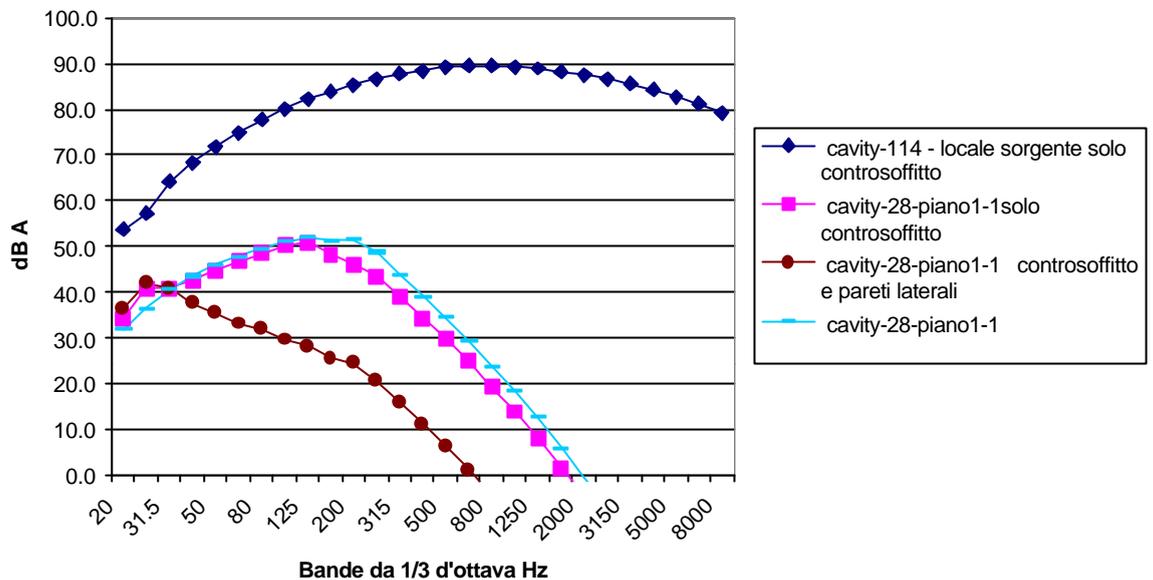
Nonostante però i grossi spessori di truciolare (massa) si può vedere dalla simulazione del grafico successivo che i risultati sono abbastanza contenuti in una riduzione di ca 2,5 dBA complessivi. Infatti, come si poteva supporre, le pareti esterne del locale sono poste in vibrazione dall'energia sonora generata nel locale sorgente e questa energia si trasmette ai piani superiori lungo le pareti esterne. Questo "inconveniente" è oggi abbastanza comune quando si utilizzano standard costruttivi civili che prevedono elementi prefabbricati rigidamente collegati tra loro.

Per ottenere allora un risultato accettabile si deve ricorrere al rivestimento anche delle pareti laterali (quelle verso l'esterno) del locale sorgente con una tecnica simile. I risultati ora sono concreti e si vede una riduzione di 13 dBA complessivi che portano il residuo nella stanza al 1° piano a 46 dBA circa. Questo livello è dovuto alle basse frequenze sotto i 63 Hz, una regione in frequenza in cui sono necessari altri tipi di accorgimenti per ridurre l'energia sonora.

Livelli di Pressione sonora A
nel locale sorgente e nelle stanze al 1o e al 2o piano



Livelli di Pressione sonora A
nelle stanze al 1o piano
con trattamento del locale sorgente



Questo semplice esempio di simulazione ha voluto dimostrare l'importanza di studiare in via preventiva il problema e valutare sul piano tecnico ed economico la validità degli interventi che si possono ipotizzare. Un intervento come quello simulato, pur nella sua validità concettuale, non risolve completamente il problema del disturbo causato dall'attività nel locale di intrattenimento, dunque si è capito che "prima" di procedere all'esecuzione degli interventi è necessario trovare altre soluzioni a compendio o in sostituzione di quella ipotizzata.

Lo studio completo del problema esula comunque dalla presente trattazione che si limita a voler dimostrare l'utilità e la valenza dei modelli di simulazione.

ed indirettamente (aumentata
attività umana, traffico,
parcheggi, ...)

inserire parte metrologica di CN

rumore: valutazione di impatto
ambientale

Inserire parte con Mitra di GM

**vibrazioni: un altro tipo di
disturbo**

Una volta rilevato il livello e lo spettro del rumore nel luogo disturbato, secondo le procedure descritte nei DPCM specifici in vigore, si dovrebbe avere una conoscenza di causa-effetto della sorgente disturbante, quello che resta da fare allora è quello di definire come “risolvere” il problema, scartando la ovvia alternativa di “spegnere” la sorgente stessa.

Una serie forse illimitata di esempi potrebbero essere citati a proposito di vibrazioni. Si pensi ad esempio alla circolazione stradale con i mezzi che transitano sui tombini di scarico, spesso succede che le condotte fognarie siano collegate direttamente, via solida, agli scarichi delle costruzioni civili e di conseguenza capita che le vibrazioni indotte dal passaggio dei mezzi vadano ad eccitare in vibrazione le strutture e si traducano poi in rumore all'interno dei

locali. Un altro esempio “classico” riguarda poi i servizi quali: bruciatore del riscaldamento, pompa acqua, ventilatori, ecc. e le tubazioni ad essi collegate, che letteralmente trasportano l’energia sonora e vibrazionale dei macchinari per tutto il percorso e la trasmettono alle strutture, le quali poste in vibrazione emettono rumore udibile.

Nel caso dell’esempio di modellazione acustica di un edificio con un locale di intrattenimento, le vibrazioni indotte nelle pareti strutturali si propagano lungo le vie “solide” e contribuiscono in modo molto efficiente al disturbo.

Un capitolo a parte delle vibrazioni è quello relativo agli effetti delle vibrazioni sul corpo umano e sul sistema mano-braccio (che esulano dalla presente trattazione), e che sono discussi da alcune normative ISO specifiche.

Affrontare le problematiche di rumore dovuto prevalentemente a vibrazioni (via solida) è forse più semplice di molti problemi di acustica (via aerea), quando però si può identificare la causa, per la quale è molto più complesso effettuare la diagnosi strumentale. Si consideri ad esempio il fatto che non tutte le vibrazioni strutturali sono efficienti nella radiazione sonora, questa infatti è legata principalmente all’elasticità della struttura, cioè alla sua capacità di risonare con modi propri in componenti di frequenza discrete.

Le vibrazioni richiedono l’utilizzo di trasduttori (accelerometri) che vengono applicati alle strutture tramite vari sistemi, i quali non devono però modificare la risposta del trasduttore. L’informazione che si ricava può essere poi un livello assoluto e/o uno spettro delle componenti in frequenza. Il primo dato è semplicemente un’informazione sul grado di vibrazione, mentre lo spettro in frequenza è la chiave di accesso per identificare le cause (sorgenti) che generano la vibrazione.

Una situazione realistica in cui non è evidente se il disturbo è prevalentemente una via aerea o una via solida, oppure non si può essere sicuri che agendo sulla via aerea il risultato sia quello atteso, a causa delle trasmissioni per via solida, necessita di una verifica della situazione tramite la misura delle funzioni di trasferimento (analisi del sistema) via aerea e via solida tra la “sorgente” e il “ricettore”, e per fare questo si deve dunque disporre di uno strumento con almeno 2 canali di analisi.

ALCUNE DEFINIZIONI

Risposta In Frequenza (Funzione Di Trasferimento)

Un analizzatore di spettro FFT a due canali permette di misurare la risposta in frequenza (FRF) che descrive il comportamento dinamico di un sistema lineare, cioè misurare le relazioni tra l’input e l’output di un sistema..

La FRF e' il rapporto tra la trasformata di Fourier della risposta temporale (output del sistema) e la trasformata di Fourier, misurata simultaneamente, del segnale di eccitazione (input del sistema) del sistema:

$$H(f) = Y(f) / X(f)$$

E' importante notare che $H(f)$ non dipende dall' ingresso $X(f)$, ma solo dalle caratteristiche del sistema. Nell' espressione di $H(f)$ dunque non compaiono mai parametri che dipendono dai segnali di ingresso, ma solo parametri che dipendono dal sistema.

La risposta in frequenza, essendo il rapporto tra due funzioni complesse, e' generalmente anch' essa una funzione complessa, essa fornisce sia il guadagno (che e' dato dall' ampiezza della funzione) che la fase in funzione della frequenza. La funzione di trasferimento del sistema e' calcolata dividendo il cross-spettro di potenza per l'auto-spettro di potenza in input.

Cross-Spettro Della Potenza

Il cross-spettro della potenza si ottiene moltiplicando lo spettro di Fourier dell'output del sistema per il complesso coniugato dello spettro di Fourier dell'input del sistema. La relazione di fase tra input e output e' completamente contenuta nel cross-spettro di potenza.

La fase delle singole righe del cross-spettro in frequenza e' data dalla differenza tra le fasi dei segnali in input e in output e l'ampiezza e' il prodotto delle singole ampiezze.

Cross-Correlazione

La funzione che lega i segnali di input e di output nel dominio del tempo e' la funzione di cross-correlazione. Questa funzione da' una misura di quanto i due segnali siano "simili" in funzione del loro relativo ritardo di tempo.

La cross-correlazione si può ottenere dal cross-spettro di potenza ed è calcolata come la trasformata inversa di Fourier del cross-spettro di potenza. Poichè la cross-correlazione e il cross-spettro di potenza sono collegati da una trasformata di Fourier, essi contengono all' incirca le stesse informazioni.

Tuttavia, quando si devono analizzare gli effetti del cammino di trasmissione, e' preferibile la rappresentazione della cross-correlazione che è in grado di dare una visuale più chiara dei ritardi di tempo e delle riflessioni (caratterizzate dai valori di picco della funzione di cross-correlazione).

Vediamone alcune proprieta' :

a) le quantita' $R_{xy}(0)$ e $R_{yx}(0)$ non hanno particolare significato, pero' si ha

$$R_{xy}(0) = R_{yx}(0)$$

b) le funzioni di cross-correlazione non sono simmetriche, ma si ha

$$R_{xy}(t) = R_{yx}(-t)$$

Coerenza e Rapporto Segnale-Rumore

Quando si misura la funzione di trasferimento di un sistema, e' interessante conoscere se l'output viene prodotto solamente dall' input del sistema stesso.

Rumore e/o non linearità possono produrre output diversi alle varie frequenze e, pertanto, introdurre errori nel calcolo della funzione di trasferimento.

In questo caso, $H(f)$ non rappresenta adeguatamente il comportamento del sistema; e' necessario trovare dunque un test sulla sua validità. Si ricorre allora alla funzione di coerenza, la quale mostra la parte dello spettro di potenza in output che e' collegata allo spettro in input in funzione della frequenza e da' indicazioni statistiche sulla validità della FRF.

La funzione di coerenza varia tra zero e uno e le cause della sua diminuzione sono principalmente quattro:

- 1) rumore esterno presente nelle misure
- 2) insufficiente risoluzione
- 3) il sistema che lega $y(t)$ a $x(t)$ non e' lineare
- 4) $y(t)$ e' dovuto anche ad altri ingressi oltre a $x(t)$

Il rapporto segnale-rumore e' un'alternativa per convalidare i risultati della misura e può essere derivato dalla funzione di coerenza. Si ottiene infatti, dividendo lo spettro coerente in uscita per lo spettro del rumore in uscita, in funzione della coerenza. Una buona coerenza comporta un ottimo rapporto segnale- rumore e viceversa.

le vibrazioni in pratica

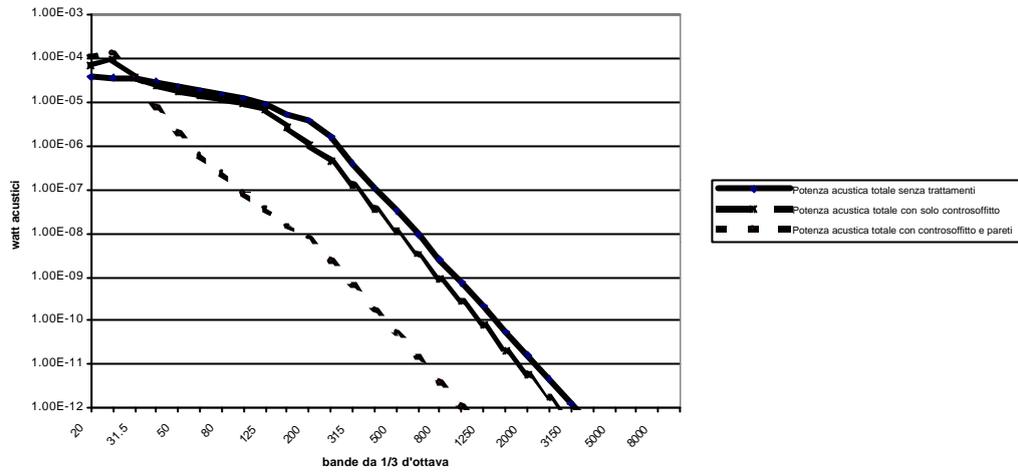
Disponendo dunque di un analizzatore di spettro a 2 o più canali, sarà possibile applicare le funzioni di correlazione e coerenza sopra definite per risalire alle vie di propagazione e definire una situazione.

Una procedura possibile è quella di fissare un trasduttore accelerometrico sulle pareti della stanza e verificare le funzioni di correlazione e coerenza tra questo e il microfono posto (per esempio) al centro della stanza. Si ripete la procedura lasciando il microfono nella stessa posizione e spostando il traduttore accelerometrico in varie posizioni, ottenendo l'informazione se le pareti della stanza sono poste in vibrazione per via aerea o per via solida.

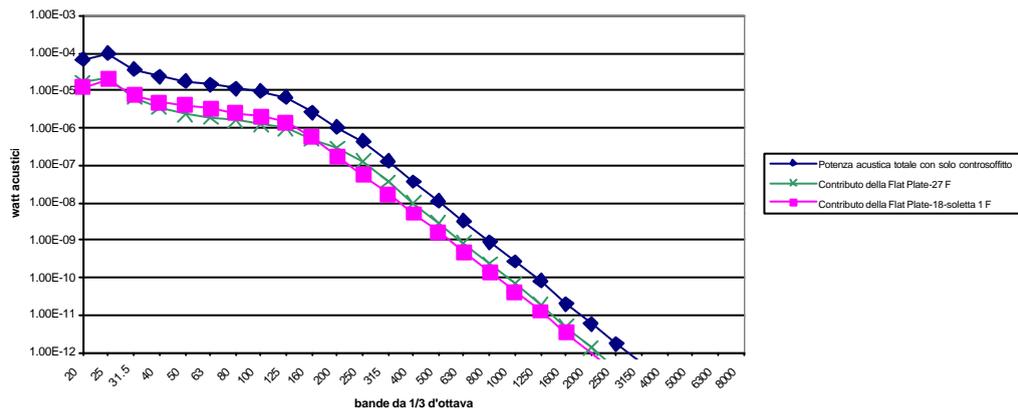
Riprendiamo la situazione del modello previsionale SEA discusso precedentemente e verifichiamo i contributi per via aerea e per via solida al rumore prodotto nella stanza al 1° piano dell'edificio, a causa dell'attività di intrattenimento svolta nel locale sorgente.

La sequenza dei grafici seguenti mostra la separazione dei contributi nella simulazione fatta, in pratica si possono ottenere le stesse informazioni con l'analisi delle vibrazioni e quindi definire a priori l'entità degli interventi necessari.

Potenza Acustica Totale alla stanza del 1o piano



Contributi in Potenza Acustica dalla soletta e dalla parete interna alla stanza del 1o piano con il solo controsoffitto



Contributi in Potenza Acustica dalla soletta e dalla parete interna alla stanza del 1o piano con il controsoffitto e le pareti laterali

