



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

---

Corso di laurea triennale in Ingegneria Meccanica  
Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

Anno Accademico 2019/2020

**METODI DI MISURA DEL  
COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO ACUSTICO  
IN SITO**

**IN SITU MEASUREMENT METHODS OF  
THE ABSORPTION COEFFICIENT**

**Relatore:**  
Ing. Fabio Serpilli

**Tesi di laurea di:**  
Francesco Sanchini

**Correlatore:**  
Ing. Valter Lori

*Alla mia famiglia*

## **INDICE**

<u>1. INTRODUZIONE: IL PROBLEMA DELL'INQUINAMENTO ACUSTICO</u>	<u>4</u>
<u>2. CENNI SULLA PROPAGAZIONE DEL SUONO</u>	<u>6</u>
<u>3. I PRINCIPALI METODI DI MISURA DEL COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO ACUSTICO IN SITO E IN LABORATORIO</u>	<u>13</u>
<u>3.1 Il metodo di misura del coefficiente di assorbimento acustico in camera riverberante (EN ISO 354:2003)</u>	<u>15</u>
<u>3.2 Il metodo Adrienne (UNI ISO 13472-1:2004)</u>	<u>18</u>
<u>3.3 Il metodo di misura del coefficiente di assorbimento acustico con l'integrazione della risposta ad impulso in sito (UNI EN 1793-5:2016)</u>	<u>21</u>
<u>3.4 I metodi di misura del coefficiente di assorbimento acustico nel tubo ad impedenza (tubo di Kundt) portatile per la misura in sito (UNI EN ISO 10534-1/2:2001 e ISO 13472-2:2010)</u>	<u>24</u>
<u>3.5 L'innovazione delle sonde PU nello sviluppo di metodi di misura del coefficiente di assorbimento acustico</u>	<u>28</u>
<u>3.5.1 Il metodo LPW (Local Plane Wave)</u>	<u>31</u>
<u>3.5.2 Il metodo LSPW (Local Specular Method) e il metodo LAPW (Local Arbitrary Method)</u>	<u>33</u>
<u>3.5.3 Il metodo di intensità ed il metodo della funzione di trasferimento a confronto</u>	<u>35</u>
<u>4. CONCLUSIONI</u>	<u>38</u>
<u>Bibliografia</u>	<u>39</u>

## 1. INTRODUZIONE: IL PROBLEMA DELL'INQUINAMENTO ACUSTICO

Il problema dell'inquinamento acustico ha assunto, nel corso degli ultimi anni, sempre più importanza all'interno della società moderna. L'esposizione prolungata a qualsiasi tipo di rumore, che accompagna quotidianamente la nostra vita, provoca malessere e problemi fisici, con un aumento significativo della pressione sanguigna e della frequenza cardiaca nei soggetti maggiormente esposti.

Per evitare tali effetti collaterali il suono indesiderato deve essere ridotto. A tal proposito le attività di monitoraggio, ricerca e sperimentazione, volte a studiare il fenomeno del rumore e gli interventi per limitarne la portata, risultano di assoluta importanza per migliorare le condizioni di vita e di salute della popolazione maggiormente esposta a tale fonte di disturbo. In questo ambito si inseriscono i materiali e/o le strutture fonoassorbenti che permettono di ridurre la componente riflessa del suono che interagisce con le varie sulle superfici. Tali materiali possono essere efficacemente utilizzati sia in ambiente esterno, come ad esempio nelle barriere antirumore, sia in ambiente interno, allo scopo di migliorare la qualità acustica.

Per questo motivo, nell'acustica applicata, è fondamentale conoscere il comportamento acustico dei materiali rispetto alla capacità di assorbire, di riflettere o di trasmettere l'energia sonora incidente su di essi.

I parametri che identificano queste proprietà si suddividono in tre categorie: parametri acustici, parametri fisici e parametri meccanici. Il presente elaborato analizza, in particolare, **i parametri acustici**, nell'ambito dei quali si annoverano il coefficiente di assorbimento acustico  $\alpha$ , il coefficiente di riflessione acustica  $r$  e/o *Reflection Index*.

Al fine di verificare la veridicità dei parametri acustici, forniti spesso dai produttori dei materiali, nasce l'esigenza di definire gli apparati di misura.

La presente tesi si propone di approfondire i metodi di misura del coefficiente di assorbimento acustico in sito e di verificarne i relativi limiti di applicazione anche in condizioni diverse da quelle per cui sono stati ideati. Partendo dal metodo Adrienne, sono state esaminate le applicazioni atipiche derivanti da esso. Vengono altresì analizzate le strumentazioni innovative capaci di risolvere le innumerevoli criticità emerse nelle singole metodologie esposte.

## 2. CENNI SULLA PROPAGAZIONE DEL SUONO

Il **suono** è una perturbazione di carattere oscillatorio che si propaga con una data frequenza in un mezzo elastico solido, liquido o gassoso. Tale perturbazione nasce per effetto delle sollecitazioni di pressione generate dalle vibrazioni di un corpo solido costituente la sorgente. Ogni volta che un oggetto si muove o vibra, una piccola porzione dell'energia coinvolta viene ceduta al mezzo circostante sotto forma di suono.

L'**assorbimento acustico** (fonoassorbimento) è la capacità di un materiale di dissipare l'energia sonora convertendola in calore.

In presenza di ostacoli, e in dipendenza della lunghezza d'onda del suono e delle dimensioni dell'ostacolo, si verificheranno fenomeni di riflessione, diffrazione e rifrazione.

Nell'ambito del presente lavoro si utilizzeranno sorgenti caratterizzate da un suono con lunghezza d'onda scelta affinché si ottenga **riflessione**, parametro fondamentale per il corretto funzionamento delle metodologie di misura del coefficiente di assorbimento in sito (e non solo).

Se le dimensioni dell'ostacolo sono grandi rispetto alla lunghezza d'onda dell'onda sonora e le irregolarità presenti sulla superficie sono molto piccole (sempre rispetto alla lunghezza d'onda), si dice che la superficie stessa appare "liscia" quindi le leggi che descrivono la riflessione delle onde sonore sono simili a quelle che regolano la riflessione delle onde elettromagnetiche e luminose.

In particolare, il raggio riflesso forma lo stesso angolo  $\vartheta$  con la normale alla superficie del raggio incidente e i due raggi giacciono sullo stesso piano (Fig.

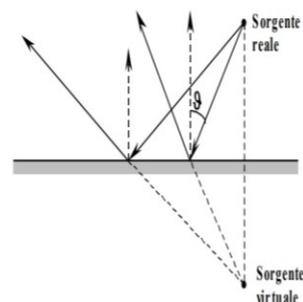


Fig. 1

1). Si parla, in questi casi, di **riflessione speculare o regolare**. Si osserva come l'onda riflessa si propaghi come se fosse emessa da una sorgente virtuale simmetrica alla sorgente reale. In questi casi ( $\lambda$  molto minore delle dimensioni lineari dell'ostacolo), si possono adottare i semplici metodi grafici dell'acustica geometrica. È interessante ricordare che nel caso di riflessione regolare su superfici lisce concave si verifichi una concentrazione dei fronti d'onda, mentre nel caso queste siano convesse si verifichi invece una loro dispersione.

Se la superficie dell'ostacolo non risulta sufficientemente liscia rispetto alla lunghezza d'onda delle onde sonore incidenti, la riflessione non è più di tipo regolare, bensì **diffusa**, come nell'esempio schematizzato nella figura che segue (Fig 2).

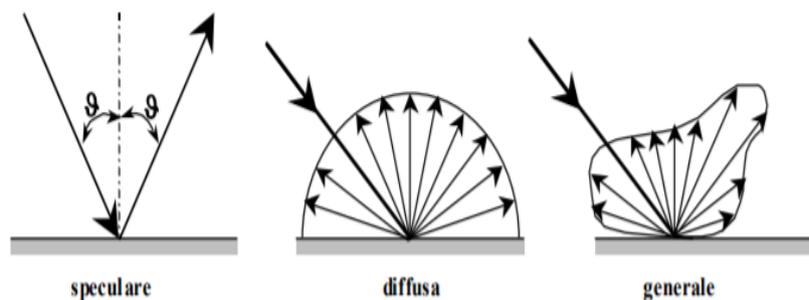


Fig. 2

E' inoltre opportuno ricordare che il comportamento delle superfici reali risulta sempre intermedio tra le due situazioni limite già note, ossia tra la riflessione speculare su una superficie liscia e la riflessione perfettamente diffusa, qualora la superficie risulti opportunamente "rugosa". Si precisa che, ovviamente, i termini "liscia" e "rugosa" vanno intesi in senso relativo e cioè in relazione alla lunghezza d'onda delle onde sonore.

In modo simile alle onde elettromagnetiche, anche per un'onda sonora d'intensità  $I_i$  incidente su una lastra si definiscono **coefficienti di riflessione, dissipazione e trasmissione** (Fig. 3).

Questi fattori, in generale variano con l'angolo di incidenza delle onde sonore e la frequenza delle onde sonore.

Per le applicazioni più comuni nell'acustica applicata è in genere sufficiente riferirsi solo a valori medi per le varie bande d'ottava o a terzi d'ottava, specificando talvolta anche le condizioni d'incidenza delle onde sonore. In questa ipotesi si può porre:

**Coefficiente di riflessione**

$$r = \frac{I_r}{I_i}$$

**Coefficiente di dissipazione**

$$\delta = \frac{I_d}{I_i}$$

**Coefficiente di trasmissione**

$$t = \frac{I_t}{I_i}$$

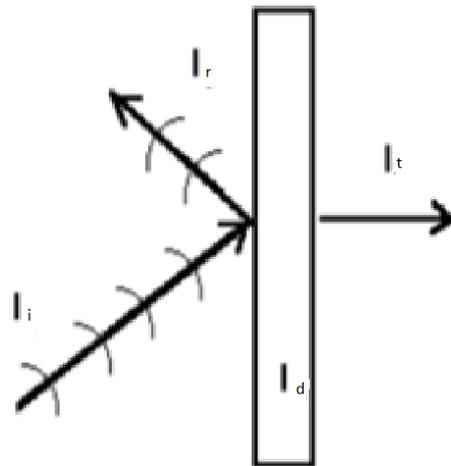


Fig. 3

dove  $I_r$ ,  $I_d$ ,  $I_t$  indicano le intensità relative rispettivamente all'onda riflessa, dissipata (nello spessore del materiale) e trasmessa (al di là della lastra).

Tra i tre coefficienti esiste, ovviamente, la seguente relazione:

$$\delta + r + t = 1$$

ad esempio, se la lastra è perfettamente riflettente ( $r = 1$ ), risulterà anche:

$$\delta = t = 0$$

È opportuno precisare che, spesso, interessa solo l'energia acustica riflessa verso l'ambiente, per cui si definisce coefficiente di assorbimento apparente  $\alpha'$ :

$$\alpha' = \delta + t$$

per cui si scrive abitualmente:

$$\alpha' + r = 1$$

Spesso, per semplicità, si indica il coefficiente d'assorbimento apparente  $\alpha'$  semplicemente con  $\alpha$ , scrivendo quindi:

$$\alpha + r = 1$$

Oltre a ciò, è opportuno ricordare che se le superfici delimitanti l'ambiente sono sufficientemente lisce ed estese (ovviamente, rispetto a  $\lambda$  del suono incidente), i raggi sonori incidenti saranno riflessi specularmente; mentre, nel caso opposto (superfici poco estese, presenza di profili irregolari, ecc.), anche a causa dei citati fenomeni di diffrazione, la riflessione avverrà in forma più o meno diffusa.

Per completezza espositiva, è necessario altresì considerare in concreto le modalità attraverso cui è possibile conseguire significativi valori di fonoassorbimento.

#### **a) Assorbimento per porosità**

In questo caso l'assorbimento acustico è dovuto al fenomeno della viscosità: la dissipazione dell'onda sonora avviene per trasformazione del suono in energia cinetica nel momento in cui lo stesso attraversa il materiale e la capacità fonoassorbente risulta quindi influenzata da densità e spessore di quest'ultimo.

I materiali assorbenti per porosità si possono a loro volta distinguere in:

- materiali fibrosi (lana di vetro, lana di roccia, truciolati di legno, sughero, fibre di poliestere, gesso, cartongesso, moquette, linoleum, tendaggi, tessuti naturali e artificiali di vario tipo)
- materiali a cellule aperte (schiume poliuretatiche, poliuretano espanso, foam melamminico);

L'assorbimento per porosità risulta generalmente elevato alle frequenze medie e medio-alte, mentre per ottenere un significativo smorzamento delle basse frequenze si richiede l'utilizzo di spessori elevati di materiale. Per un efficace impiego del materiale fonoassorbente occorre discostarlo di qualche centimetro (minimo 5 cm fino ad oltre 30 cm) dagli elementi strutturali piani (si pensi al caso dei controsoffitti in cartongesso con eventuale aggiunta di lana minerale).

Per aumentare il potere fonoassorbente dei materiali porosi piuttosto che utilizzare quelli di tipo liscio (Fig. 4-A) è possibile conformarli con sagomature tali da aumentarne la superficie totale di contatto con l'onda sonora, per una migliore dissipazione cinetica come nel caso dei materiali fonoassorbenti bugnati (Fig. 4-B), piramidali (Fig. 4-C), o dei baffles sfaccettati di tipo Keller (Fig. 4-D).

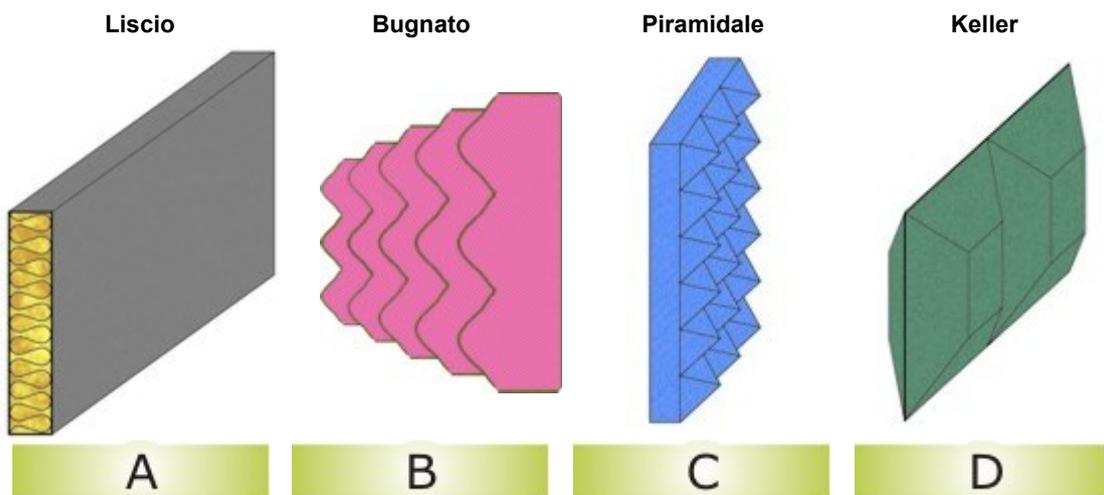


Fig. 4 Materiali fonoassorbenti porosi (assorbenti acustici per porosità)

## b) Assorbimento per risonanza di membrana

L'assorbimento avviene tramite il posizionamento di un pannello di buona densità a distanza di qualche decina di centimetri dalla parete in modo che lo smorzamento si verifica tramite il sistema massa-aria-massa che entra in gioco anche per realizzare prestazioni di tipo fonoisolante. Il pannello risona alla sua frequenza di coincidenza e l'intensità sonora viene smorzata dal cuscino d'aria retrostante.

Naturalmente l'efficacia di questo sistema è limitata all'assorbimento di quelle frequenze per le quali avviene la risonanza, tuttavia è sufficiente frapporre, nell'intercapedine, del materiale fonoassorbente di tipo poroso o fibroso per aumentare l'efficacia fonoassorbente su una gamma sonora ben più ampia.

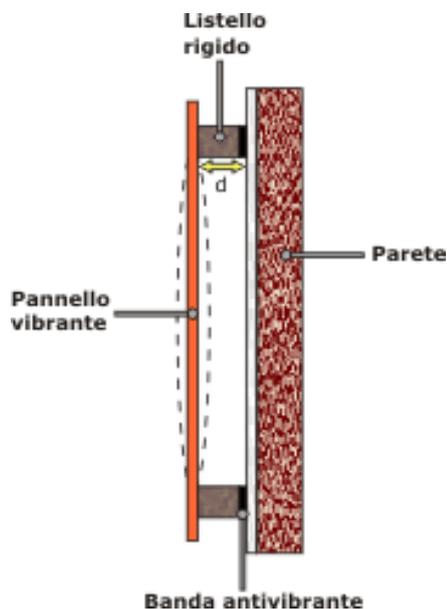


Fig. 5

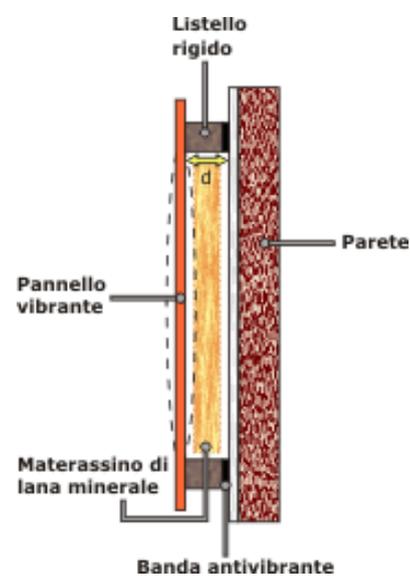


Fig. 6

Sistemi fonoassorbenti per risonanza di membrana: sistema semplice (Fig. 5) e sistema con interposto materiale poroso (Fig. 6) per migliorare la fonoassorbenza su un più ampio Range di frequenza.

### c) Assorbimento per risonanza di cavità

L'assorbimento avviene per viscosità che si realizza all'imboccatura (collo) di un'area cava all'interno del materiale, che pertanto si presenta forato o fessurato, tramite il principio di funzionamento del cosiddetto risuonatore di Helmholtz.

Si tratta di una forma di assorbimento molto selettiva, che agisce su una gamma parecchio ristretta di frequenze. E' la soluzione elettiva per quelle fattispecie di correzione acustica ambientale limitate a specifiche e omogenee fonti di disturbo (es: voce umana, macchinari rumorosi analoghi tra di loro).

Naturalmente, qualora le esigenze di fonoassorbimento riguardino uno spettro sonoro particolarmente ampio, si potrà ricorrere a soluzioni miste che adottano contemporaneamente le tecnologie suddette (ad esempio con l'utilizzo di un materassino assorbente per porosità posto dietro pannelli forati che assorbono per risonanza di cavità).

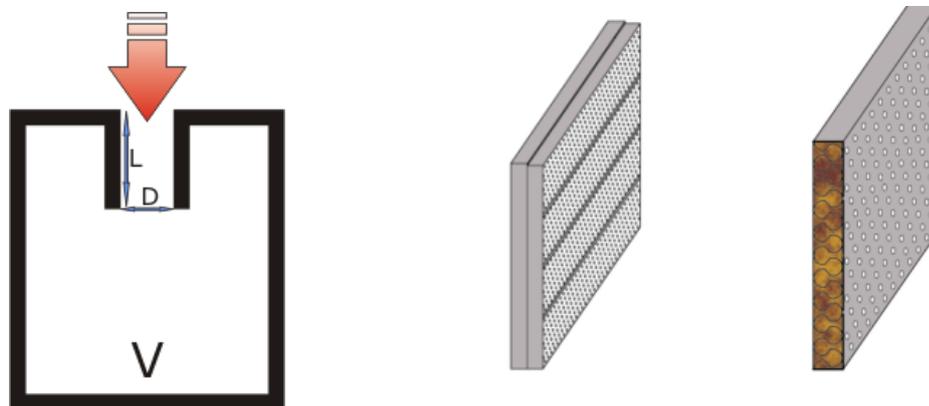


Fig. 7

L'assorbimento acustico determina delle modifiche sui tempi di riverbero del suono in ragione della frequenza e anche per questo motivo è un parametro fondamentale per la correzione acustica di ambienti particolari, per i quali si richiedono determinate caratteristiche acustiche (come ad esempio teatri, cinema, sale d'ascolto, discoteche, palestre).

### **3. I PRINCIPALI METODI DI MISURA DEL COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO ACUSTICO IN SITO E IN LABORATORIO**

I diversi metodi di misura del coefficiente di assorbimento acustico sono stati sviluppati per essere applicati in laboratorio oppure in sito. Essi permettono di valutare il coefficiente di assorbimento acustico in diverse condizioni del campo sonoro. In particolare i diversi metodi permettono la valutazione del coefficiente di assorbimento acustico per incidenza diffusa, oppure incidenza frontale, oppure incidenza obliqua.

Questi metodi sono generalmente basati su protocolli sviluppati in ambito di progetti europei, e offrono un quadro dettagliato dei parametri fondamentali per identificare il comportamento acustico dei materiali.

I **metodi di laboratorio** valutano le proprietà acustiche dei materiali in condizioni controllate, in assenza di tutti quei fenomeni che si manifestano nelle reali condizioni di esercizio, quali riflessioni spurie, assorbimenti di superfici presenti nell'area di analisi o altre condizioni al contorno che possono influire sui risultati finali. Permettono generalmente di determinare in modo più preciso ed affidabile le proprietà acustiche dei materiali sotto analisi ma richiedono l'utilizzo di camere di prova speciali e grandi campioni di materiale e/o strumentazioni da laboratorio. Per questo motivo sono stati negli anni sviluppati numerosi metodi di misura in sito che rappresentano l'argomento del presente lavoro di tesi.

I vantaggi associati alle **misure eseguite in sito**, rispetto a quelle effettuate in laboratorio, sono molteplici. In primis, il campione non deve essere sottratto alla sua sede naturale; inoltre, le proprietà acustiche sono rilevate nelle reali condizioni di installazione o esercizio, senza essere affette da contaminazioni derivanti da condizioni al contorno differenti. Tuttavia, se da un lato questo aspetto è un vantaggio, dall'altro esso espone il metodo all'influenza di fattori non facilmente controllabili e introduce spesso problemi legati a protocolli di misura non standardizzati.

Nei successivi paragrafi vengono analizzati i principali metodi per le misure in sito, evidenziandone le caratteristiche, la strumentazione in uso e le maggiori criticità. Per completezza espositiva, è altresì esaminato il metodo di misura del coefficiente di assorbimento in camera riverberante in quanto è un metodo di laboratorio spesso usato sia dai produttori di materiali che dai ricercatori. I primi, infatti, giustificano con questo metodo i valori di  $\alpha$  presentati nelle schede tecniche mentre i secondi lo utilizzano come termine di paragone con i metodi sperimentali o come metodologia di verifica.

### 3.1 Il metodo di misura del coefficiente di assorbimento acustico in camera riverberante (EN ISO 354:2003) [1]

Il metodo si basa sullo studio del **campo riverberante** e della **curva di decadimento**, dovuto allo spegnimento della sorgente operante in un ambiente chiuso, i quali dipendono dalle caratteristiche fonoassorbenti delle pareti e degli oggetti che sono presenti nella stanza. Questo metodo permette di determinare i valori del coefficiente di assorbimento acustico in condizioni di incidenza diffusa.

La normativa di riferimento, EN ISO 354:2003, prescrive che si disponga di un vasto campione di materiale di grandi dimensioni (10-12 mq) di cui si vuole misurare il coefficiente di assorbimento acustico (una superficie così vasta, infatti, è in grado di modificare sensibilmente il tempo di riverberazione della stanza) e che la misurazione venga effettuata in una stanza speciale, detta **camera riverberante**. Si tratta di un ambiente avente volume di circa 200 m<sup>3</sup>, con pochissimo assorbimento e forma irregolare e/o presenza di elementi diffondenti appesi, in modo che all'interno si stabilisca un perfetto campo diffuso e che il comportamento acustico dell'ambiente venga correttamente descritto dalla **formula di Sabine**:

$$T_{60} = \frac{55.3}{c} \cdot \frac{V}{A}$$

in cui **A** sono le unità assorbenti totali, cioè:

$$A = \sum_i (\alpha_i \cdot S_i)$$

La figura che segue (Fig. 8) schematizza la geometria di una camera riverberante, con la superficie di prova posizionata sul pavimento ed 11 elementi diffondenti appesi al soffitto:



Fig. 8

Siccome il coefficiente di assorbimento acustico dipende anche dall'angolo di incidenza dell'onda sonora, è molto importante che la geometria della stanza e la disposizione di eventuali oggetti all'interno di essa vengano studiati assicurandosi che il campo sonoro risulti il più possibile assimilabile a un campo diffuso, cercando di risolvere il problema delle risonanze. Soddisfatte tali condizioni, la camera diventa ideale per lo studio di materiali fonoassorbenti e della potenza sonora di macchinari ed apparecchiature.

Grazie all'applicazione della formula di Sabine, è possibile determinare, al variare di un ampio spettro di frequenze, l'area di assorbimento equivalente della stanza vuota  $A_1$  [ $\text{m}^2$ ], a partire dalla misurazione del tempo di riverberazione  $T_1$  con una delle tecniche già note (rumore stazionario interrotto, risposta all'impulso con integrazione di Schroeder, etc...), tramite la formula inversa:

$$A_1 = \frac{55.3}{c} \cdot \frac{V}{T_1}$$

A questo punto si introducono nella camera riverberante i 10 m<sup>2</sup> di materiale in prova, e si misura nuovamente il tempo di riverberazione, che risulterà pari a **T<sub>2</sub>**, inferiore a **T<sub>1</sub>**. Conseguentemente si avrà:

$$A_2 = \frac{55.3}{c} \cdot \frac{V}{T_2} = A_1 + \alpha_x \cdot S_x$$

in cui  $\alpha_x$  è il coefficiente di assorbimento incognito del materiale in prova ed  $S_x$  la sua superficie in m<sup>2</sup>. Per cui è possibile ricavare  $\alpha_x$  :

$$\alpha_x = \frac{55.3 \cdot V}{c \cdot S_x} \cdot \left[ \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right]$$

Eseguendo le misurazioni alle varie frequenze, in bande di 1/3 di ottava, si ottiene lo spettro dei valori di  $\alpha$  del materiale.

Va osservato, tuttavia, che, anche se le condizioni di validità della formula di Sabine erano rispettate a camera vuota, esse non lo sono più quando si introduce il materiale fonoassorbente. Infatti, l'assorbimento acustico viene ad essere tutto concentrato su una piccola superficie, anziché distribuito lungo l'intero perimetro. Questo introduce un errore sistematico, che porta a sovrastimare il coefficiente di assorbimento del materiale introdotto. In taluni casi, dall'utilizzo delle relazioni di calcolo suddette, escono valori di  $\alpha$  significativamente maggiori di 1.0, fino ad arrivare anche ad 1.2 e 1.3. Questi valori, teoricamente non accettabili, si riferiscono in realtà ai valori di una grandezza fisica diversa, chiamata "Alfa Sabine" o "Coefficiente di assorbimento acustico in campo diffuso". Poiché si misurano in questo modo valori di  $\alpha$  più grandi, i produttori di materiali fonoassorbenti tendono a dichiarare sempre sui cataloghi dei loro prodotti questi valori di Alfa Sabine, anziché i valori di "Alfa Vero" che possono essere misurati con il tubo di Kundt.

E' molto importante conoscere questo metodo al fine di avere, sempre, come parametro di confronto, una misura sicura, affidabile e controllata da affiancare ai metodi in sito per valutarne i risultati.

### 3.2 Il metodo Adrienne (UNI ISO 13472-1:2004) [2]

Il metodo Adrienne è una procedura standardizzata descritta dalla norma **UNI ISO 13472-1:2004**, per la misura in sito del coefficiente di assorbimento acustico delle pavimentazioni stradali o più in generale di superfici estese piane, definito come rapporto tra la potenza sonora che entra nella pavimentazione (senza ritorno) e la potenza sonora incidente.

Le proprietà di assorbimento della superficie sono determinate per incidenza normale, ma la valutazione può essere estesa anche per incidenza obliqua con le limitazioni previste dalla norma sopracitata. Tali proprietà si determinano a partire dalla misura del fattore di riflessione, dato dal rapporto tra la potenza sonora riflessa e quella incidente sulla superficie di prova. Il rapporto tra le due componenti si misura rilevando in successione il segnale diretto e riflesso generato da una sorgente, di caratteristiche nota, verso la pavimentazione (Fig. 9).

Il segnale di misura è generato da un **altoparlante** sospeso sopra il materiale da testare; tra la sorgente e la superficie è interposto un **microfono** (Fig. 10).



Fig. 9

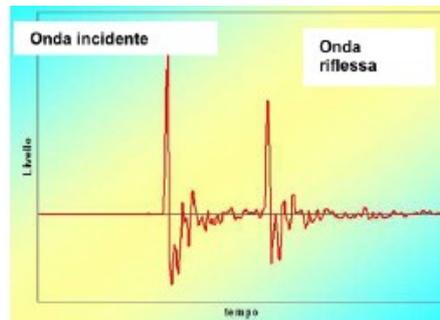


Fig. 10

Il metodo consiste nella misura ed analisi della risposta impulsiva del sistema. Quindi, effettuando una misura in campo libero (misurando il solo contributo del segnale diretto) e attraverso una specifica elaborazione dati è possibile separare i contributi dei due segnali e calcolare il coefficiente di assorbimento dell'area di

pavimentazione indagata. La finestra di analisi utilizzata per isolare le parti utili degli impulsi da analizzare nel dominio della frequenza è la **finestra Adrienne**, di lunghezza fissa (della parte piatta più la coda smorzante) di 7,4 ms (o 7,9 ms considerando anche la parte di inviluppo iniziale).

Considerando l'intensità dell'onda progressiva incidente ortogonalmente sul campione, in seguito all'impatto con esso, si dividerà in due contributi:

-  $I_{ass}$ , intensità assorbita dal campione

-  $I_{rif}$ , intensità riflessa dal campione

Cioè:

$I_{inc} = I_{rif} + I_{ass}$  dalla quale, dividendo membro a membro per  $I_{inc}$  si ottiene:

$$1 = r + \alpha$$

dove

$r = I_{rif} / I_{inc}$  è il *coefficiente di riflessione*

$\alpha = I_{ass} / I_{inc}$  è il *coefficiente di assorbimento*.

Si evidenzia che entrambi sono numeri puri. È *indifferente* conoscere  $r$  o  $\alpha$  di un materiale, ma è *importante* conoscere uno dei due, dato che conoscendo uno posso ricavare sempre l'altro.

Il metodo prevede che l'unità sorgente-ricevitore sia coassiale e posizionata normalmente alla superficie da analizzare. Il sistema è fissato su un supporto che consente di ruotarlo orizzontalmente e verticalmente attorno allo stesso punto centrale. Il sistema può anche essere regolato in altezza al fine di massimizzare la distanza da tutte le altre superfici. Al fine di caratterizzare un tratto di strada è necessario fare misure in più posizioni e su più corsie.

Esso si applica sia alle pavimentazioni stradali sia alla verifica in opera dell'efficienza delle barriere acustiche, per la rapidità di esecuzione dei rilievi e per

la relativa facilità con cui il sistema di misura può essere spostato, consentendo l'acquisizione di numerosi dati in tempi contenuti.

Il metodo Adrienne è **statico** e **puntuale**. Nel caso di pavimentazioni stradali, ciò richiede la limitazione del flusso di traffico sul segmento in esame e impone importanti requisiti per la sicurezza degli operatori durante le misure. La norma non riporta indicazioni chiare sulla ripetibilità e sulla riproducibilità del metodo ed elenca alcune delle componenti all'incertezza di misura e delle grandezze di influenza.

La misura è influenzata dalle condizioni ambientali: velocità del vento, temperatura ambiente e della pavimentazione devono rispondere ai requisiti specificati dalla norma. La superficie di misura deve, inoltre, essere asciutta e priva di umidità residua, anche all'interno dei pori, nel caso di usure drenanti.

La presenza di elementi riflettenti in prossimità del punto di indagine può generare riflessioni spurie, che sovrapponendosi al segnale di misura impediscono l'estrazione delle componenti utili alla determinazione dell'energia assorbita. Il soddisfacimento dell'insieme di tali requisiti risulta non realizzabile su qualsiasi tratto di strada e la misura è rappresentativa esclusivamente della porzione di superficie sottoposta a prova.

Al di là delle specifiche **criticità** sopra descritte, occorre sottolineare che il metodo è non distruttivo ed è praticamente insensibile al rumore di fondo. L'utilizzo di segnali **MLS** (ovvero segnali binari, riproducibili e periodici, che permettono di scegliere il periodo per avere il miglior rapporto segnale/impulso) permette, per un elevato livello di correlazione tra i segnali generato e rilevato, una consistente discriminazione dal rumore per valori del rapporto segnale/rumore **(S/N) > 10dB**. Il rapporto S/N può essere migliorato aumentando la durata del segnale MLS ed il numero delle ripetizioni, a discapito, però del tempo di misura.

### **3.3 Il metodo di misura del coefficiente di assorbimento acustico con l'integrazione della risposta ad impulso in sito (UNI EN 1793-5:2016) [3]**

Sviluppato nell'ambito del metodo Adrienne, è **stato introdotto per misurare le prestazioni acustiche delle barriere antirumore**. Questo metodo inserisce due nuove grandezze rappresentative delle caratteristiche intrinseche dei sistemi antirumore: il ***Reflection Index RI***, per le caratteristiche di riflessione, e il ***Sound Insulation Index SI***, per quelle di fonoisolamento per via aerea (quest'ultimo esula dal presente elaborato).

Tendenzialmente nel sistema di ***Reflection Index RI*** viene seguito lo schema presentato nel metodo Adrienne, ovvero la sorgente viene posta di fronte alla barriera da testare. Il microfono, posto tra la sorgente e la barriera, acquisirà, nell'ordine, la componente diretta (ovvero l'onda sonora proveniente dalla sorgente), la componente riflessa (ovvero l'onda sonora riflessa dalla barriera) e le componenti di riflessioni parassite (ovvero le onde sonore provenienti da tutte le superfici che non siano la barriera da testare, quali suolo, contorni laterali della barriera, sostegno della sorgente, sorgente, ecc.). L'insieme di queste tre componenti forma la **risposta all'impulso globale del sistema**.

Il metodo di prova si basa sulla separazione della componente diretta e di quella riflessa attraverso una **tecnica detta della sottrazione**: dalla risposta globale viene sottratta la componente diretta al fine di ottenere la componente riflessa.

Per poter applicare questa tecnica è necessario conoscere con precisione l'ampiezza, la forma e il tempo di arrivo della componente diretta: ciò è reso possibile eseguendo una misura in campo libero, posizionando la sorgente e il microfono verso una zona priva di superfici riflettenti e mantenendo costanti le caratteristiche geometriche del sistema sorgente-microfono (che devono essere connessi stabilmente in modo tale che la distanza tra essi non vari tra la misura eseguita di fronte alla barriera e quella eseguita in campo libero).

Con la tecnica della sottrazione, si può quindi dedurre sia la risposta all'impulso della componente diretta (ottenuta dalla misura in campo libero) che della componente riflessa; in entrambe, però, sono ancora presenti i contributi dovuti alle riflessioni parassite, che vanno eliminate attraverso un'apposita operazione di finestatura. La finestra, proposta dalla EN 1793-5, è detta Adrienne, già descritta in precedenza (Cap. 3.2). La catena di misura, necessaria alla valutazione dell'indice di riflessione  $RI$  è composta dai seguenti elementi: un sistema elettroacustico, costituito da un generatore di segnale elettrico, un amplificatore di potenza ed un altoparlante, un microfono con il suo amplificatore, un analizzatore di segnale capace di eseguire trasformazioni tra il dominio temporale e quello di frequenza. Alla sorgente deve essere inoltre fornito un segnale MLS (già descritto al Cap. 3.2).

Il sistema Adrienne (UNI 13472-1:2004) misura per incidenza normale ed è sicuramente più stabile offrendo prestazioni superiori, ma presenta il limite di non essere dotato di alcun goniometro per la misurazione dell'angolo di rotazione dell'insieme sorgente-microfono, così come invece richiederebbe la norma EN 1793-5 che prescrive l'esecuzione di nove misurazioni orientando l'insieme altoparlante-microfono secondo altrettante direzioni, formanti rispetto alla barriera, i seguenti angoli su un piano orizzontale:  $50^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $80^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $100^\circ$ ,  $110^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $130^\circ$ . Quindi, il metodo 1793-5, presentando l'indice  $RI$ , fornisce una nuova definizione di coefficiente di riflessione acustica rispetto al metodo Adrienne per incidenza normale e calcolandolo come una media delle riflessioni ottenute muovendo il sistema altoparlante-microfono di  $10^\circ$  alla volta [4].

L'espressione utilizzata per calcolare il *Reflection Index*  $RI$  in funzione della frequenza, in bande di 1/3 di ottava, è:

$$RI_J = \frac{1}{n_j} \sum_{k=1}^{n_i} \frac{\int_{\Delta f_j} |F[t \cdot h_{r,k}(t) \cdot w_r(t)]|^2 df}{\int_{\Delta f_j} |F[t \cdot h_i(t) \cdot w_i(t)]|^2 df}$$

dove:

$h_i(t)$  è il componente di riferimento della risposta all'impulso in campo libero;  
 $h_{rk}(t)$  è il componente riflesso della risposta all'impulso nel  $k$ -esimo angolo;  
 $w_i(t)$  è la finestra temporale del componente di riferimento incidente in campo libero (finestra temporale di Adrienne);  
 $w_r(t)$  è la finestra temporale del componente di riflesso (finestra temporale di Adrienne);  
 $F$  è il simbolo della trasformata di Fourier;  
 $j$  è l'indice delle bande di frequenza di 1/3 di ottava (tra 100 Hz e 5 kHz);  
 $A_{fj}$  è l'indice della  $j$ -esima banda di frequenza di 1/3 di ottava;  
 $n_j$  è il numero degli angoli su cui basare la media;  
 $t$  è un tempo la cui origine è all'inizio della risposta all'impulso acquisita dalla catena di misura.

Una volta determinato  $RI$  è possibile calcolare il coefficiente di assorbimento acustico  $\alpha_o$  come suo complementare all'unità:  $\alpha_o = 1 - RI$ .

La presenza della moltiplicazione per il tempo al numeratore e al denominatore nella formula dell' $RI$  serve per tener conto dei diversi percorsi delle onde sonore provenienti dalle diverse porzioni della barriera e che, quindi, giungono al microfono con ritardi temporali differenti e, per la legge dell'attenuazione delle onde sferiche, con ampiezze diverse. Dopo aver calcolato i valori dell'indice di riflessione in bande di 1/3 di ottava, bisogna calcolare l'indice di valutazione della riflessione sonora DLRI con la seguente relazione:

$$DL_{RI} = -10 \log_{10} \left[ \frac{\sum_{i=4}^{18} RI_i \cdot 10^{0,1L_i}}{\sum_{i=4}^{18} 10^{0,1L_i}} \right]$$

dove  $L_i$  è lo spettro normalizzato del rumore da traffico, definito dalla 1793-3, secondo cui va pesato il  $RI$ .

### 3.4 I metodi di misura del coefficiente di assorbimento acustico nel tubo ad impedenza (tubo di Kundt) portatile per la misura in sito (UNI EN ISO 10534-1/2:2001 e ISO 13472-2:2010) [5] [6] [7]

La sperimentazione con il tubo di Kundt in sito è stata introdotta solo recentemente e **rappresenta un ulteriore tentativo di fare una misura non distruttiva del coefficiente di assorbimento**. Tale metodo risulta applicabile, tuttavia, solo su pavimentazioni o materiali a basso assorbimento.

La tecnica è non invasiva (non necessita di carote di materiale per poter effettuare la misura come avviene nell'applicazione del tubo di Kundt in laboratorio) ed è basata sul **metodo del tubo ad impedenza**.

Il tubo ad impedenza è il più comune metodo di laboratorio utilizzato per misurare il coefficiente di assorbimento acustico per incidenza normale delle pavimentazioni stradali.

La norma **ISO 10534** prevede la possibilità di utilizzare due metodologie di misura:

#### 1) Metodo del tubo ad onde stazionarie

Serve a misurare l'impedenza e il coefficiente di assorbimento acustico (grandezza derivata dell'impedenza) di un campioncino di materiale. Nella figura che segue (Fig. 11) è schematizzato nelle sue parti fondamentali.

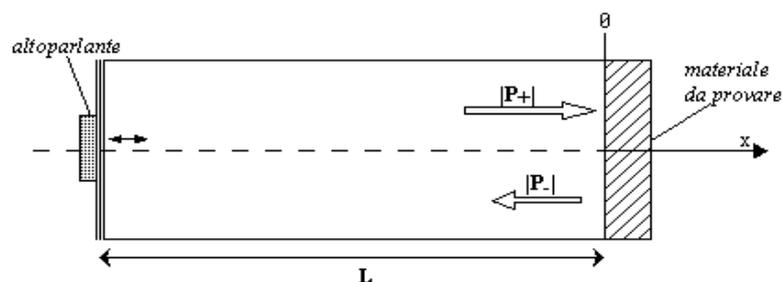


Fig. 11

Tale apparato è costituito da un **tubo**, in una estremità del quale è collocato un **altoparlante** (o un pistone) che ha lo scopo di generare un treno di onde piane progressive che si propagano all'interno del tubo; l'altra estremità del tubo termina con un oggetto, un campioncino costituito da un pezzo del materiale di cui vogliamo determinare impedenza e il coefficiente di assorbimento acustico.

Il principio di misura consiste nel rilevare i punti di pressione minima e massima dell'onda stazionaria nel tubo in quanto, la loro conoscenza, sarà sufficiente per determinare il coefficiente di assorbimento. Essi vengono rilevati grazie a un **microfono** che è in grado di muoversi all'interno di un tubo.

Per definire il coefficiente di riflessione e di impedenza acustica devono essere misurati anche:

- la distanza tra la superficie di riferimento del campione e il primo minimo di pressione.
- la lunghezza  $\lambda_0$  dell'onda stazionaria.

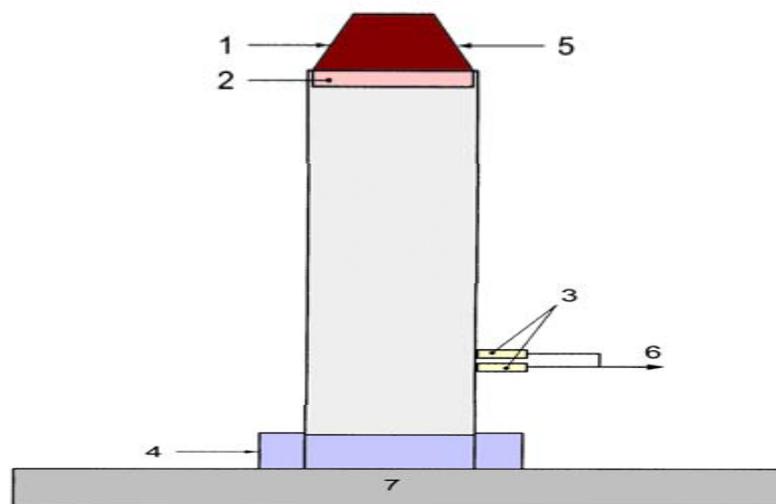
Le misure effettuate con questo metodo sono valide in un intervallo di frequenze che dipende dalla lunghezza e dalla sezione del tubo. La lunghezza deve essere tale da garantire la presenza di almeno due minimi di pressione.

## 2) Metodo della funzione di trasferimento

Questa metodologia contempla l'uso di **due microfoni** ed un sistema digitale di analisi in frequenza (**analizzatore di spettro**). Le misure adottano principi differenti rispetto al metodo precedente in quanto la sorgente non genera toni puri ma segnali casuali o pseudocasuali. La frazione del segnale riflesso viene rilevata dai due microfoni montati sulla parete del tubo. La funzione di trasferimento complessa viene calcolata tra i segnali forniti dai microfoni e, da questa, si ricavano il

coefficiente di riflessione, quello di assorbimento e l'impedenza superficiale del materiale.

Nell'immagine che segue (Fig. 12) si può notare un tubo di Kundt che sfrutta il metodo della funzione di trasferimento, modificato inserendo un sistema di fissaggio alla superficie [4]. Quindi qui il campione (o carota) non è fissato all'interno del tubo, ma viene fissato il tubo stesso sulla pavimentazione tramite attacco a tenuta d'aria.



**Legenda: 1. Altoparlante; 2. Isolamento per vibrazioni; 3. Microfoni; 4. Sistema di fissaggio alla superficie; 5. Sorgente ed amplificatore (segnale in ingresso); 6. Analizzatore di spettro (segnale in uscita); 7. Superficie di prova**

Fig. 12 – Tubo di Kundt portatile: configurazione del sistema di misura.

Come già sottolineato questo metodo trova applicazione in sito e pertanto dovrebbe fornire risultati confrontabili nelle bande di terzi d'ottava comprese tra 315 e 1600 Hz. In realtà i rispettivi campi di applicazione e la conseguente accuratezza sono molto differenti. Il metodo Adrienne ha un'accuratezza limitata a valori molto bassi di assorbimento acustico (di fatto inutilizzabile per pavimentazioni chiuse o comunque non assorbenti); viceversa, la presente metodica è inaccurata se applicata a pavimentazioni caratterizzate da un alto coefficiente di assorbimento in quanto lavora sulla porzione del suono che viene riflessa.

Essa è anche applicabile su superfici diverse dalle pavimentazioni stradali. L'unico grosso limite è che fornisce informazioni su porzioni molto ridotte di superficie (qualche  $\text{dm}^2$ ), per cui occorrono numerose misure per avere informazioni spazialmente significative di lunghe estese stradali.

Infine, occorre evidenziare che il sistema di misura necessita di un accurato montaggio a terra per mantenere la tenuta dell'aria ed impedire perdite laterali di energia, che il sistema assimila alle componenti assorbite dallo strato di pavimentazione intercettato, dando luogo ad un incremento del coefficiente di assorbimento misurato rispetto a quello effettivo.

### 3.5 L'innovazione delle sonde PU nello sviluppo di metodi di misura del coefficiente di assorbimento acustico

Le sonde di intensità PU sono dispositivi costituiti da una coppia di **sensori** (pressione-velocità) che rilevano la **velocità** di flusso dell'aria e la **pressione** dell'onda sonora, consentendo in questo modo di determinare l'impedenza e quindi il coefficiente di assorbimento di materiali e strutture con elevata risoluzione spaziale [8].

Il principio di funzionamento del sensore di velocità si basa sulla misurazione della differenza di temperatura tra due fili molto vicini. Le variazioni misurabili della resistenza causate dalle variazioni di temperatura sono direttamente proporzionali alla velocità della particella acustica. A causa della versatilità del sensore, sono state sviluppate diverse implementazioni in base alle condizioni di misurazione e all'applicazione richiesta. La sonda di intensità PU è ottenuta aggiungendo al sensore di velocità sopraccitato un trasduttore di pressione.



Le **caratteristiche** più importanti delle sonde PU sono:

- le dimensioni ridotte della sonda e la sua configurazione sono totalmente indipendenti dalla gamma di frequenza di interesse;
- l'elevata gamma dinamica di velocità del campo vicino e bassa influenza sul rumore di fondo o sui riflessi;
- la capacità di misurare l'intensità del suono con un indice ad alta intensità di pressione.

Nel caso delle pavimentazioni stradali sono in corso sperimentazioni per verificare la possibilità di eseguire la **misura del fonoassorbimento in maniera**

**dinamica**, installando su un veicolo la sonda PU, opportunamente schermata e ammortizzata per ridurre l'influenza del vento e l'effetto delle vibrazioni (Fig. 13).



Fig. 13

Per quanto riguarda la **misura del fonoassorbimento in maniera statica**, la sonda viene appoggiata su un trepiede o ha un impugnatura per tenere il sistema (Fig. 14). L'apparecchiatura è costituita da un altoparlante con una copertura sferica e una sonda PU posta ad una ventina di cm di distanza da essa (Fig. 15). La distanza e l'orientamento tra l'altoparlante e la sonda devono rimanere invariati durante le misurazioni, così come i parametri di acquisizione dei dati, la sensibilità delle sonde e l'impedenza dell'aria.



Fig. 14



Fig. 15

La procedura di misurazione è divisa in due fasi, prima viene misurata l'impedenza di campo libero poi l'impedenza vicino al campione. Quest'ultima viene misurata supponendo che la sorgente si comporti come un'eccitazione puntuale con incidenza normale e che qualsiasi differenza tra l'incidente e il fronte d'onda riflesso sia causata dal materiale valutato. Possiamo stimare l'assorbimento seguendo la seguente formulazione:

$$\alpha = 1 - |R|^2 = 1 - \left| \frac{\frac{Z_m}{Z_f} - 1}{\frac{Z_m}{Z_f} \frac{r}{r+2h} \frac{ik(r+2h)+1}{ikr+1} + 1} \frac{r+2h}{r} e^{ik2h} \right|^2$$

dove  $R$  è il coefficiente di riflessione complesso,  $r$  e  $h$  sono rispettivamente le distanze tra sonda-altoparlante e sonda-campione,  $\alpha$  è il coefficiente di assorbimento.

La pressione e la velocità possono essere misurate sull'intero intervallo udibile; tuttavia, il limite di calcolo dell'impedenza acustica è compreso tra 100 e 300 Hz. Questa limitazione è causata sia dai bassi livelli di radiazione dell'altoparlante alle basse frequenze sia dall'uso di piccoli campioni [9].

D'altra parte, studiare materiali rigidi con coefficienti di assorbimento molto basso, quindi altamente riflettenti (dove la velocità dell'aria è molto bassa), aumenterà l'errore di misurazione.

La sensibilità legata al sensore di velocità presuppone l'uso di **velocità  $\geq 10$  mm/s**: questa è l'unica criticità legata all'apparecchiatura altoparlante-sonda PU utilizzata statisticamente.

### 3.5.1 Il metodo LPW (Local Plane Wave)

E' un metodo sviluppato per misurare direttamente il coefficiente di assorbimento nel campo sonoro effettivo proprio di fronte al materiale. Il metodo non si basa su alcuna conoscenza preliminare della sorgente sonora: misura solo l'intensità del suono incidente nel sito di interesse. Ciò è stato realizzato utilizzando un presupposto di **onda piana locale**, permettendo al campo sonoro locale di essere diviso in un'onda incidente e un'onda riflessa. Le intensità associate possono quindi essere misurate e integrate sull'area per calcolare il rapporto di potenza che ci dà  $\alpha$ .

Nella versione più semplice di tale metodo, usiamo la pressione misurata,  $P$  e la velocità delle particelle misurata normale alla superficie assorbente,  $U \cdot \vec{n}$  (o 2 pressioni vicine come in una sonda di intensità 2p). Sulla base di queste due quantità misurate, possiamo formulare il semplice sistema di equazioni per due onde piane e risolvere l'ampiezza complessa  $A$  dell'onda in arrivo e l'ampiezza  $B$  dell'onda riflessa

$$A = \frac{1}{2} (P + \rho_0 c_0 \vec{U} \cdot \vec{n})$$
$$B = \frac{1}{2} (P - \rho_0 c_0 \vec{U} \cdot \vec{n})$$

dove  $\rho_0$  e  $c_0$  sono rispettivamente la **densità** e la **velocità del suono**. Possiamo quindi calcolare l'intensità associata all'onda in entrata come:

$$I_{in} = \frac{A\bar{A}}{2\rho_0 c_0},$$

dove la barra denota il complesso coniugato (per l'intensità del campo riflesso  $I_{rif}$  basta sostituire  $AA$  con  $BB$ , l' $I_{tot} = I_{rif} + I_{in}$ ). Si noti che l'angolo effettivo di incidenza dell'onda sulla superficie può essere diverso dall'incidenza normale; abbiamo solo bisogno di un'approssimazione dell'intensità che scorre normalmente in superficie.

Nonostante la sua semplicità, questo metodo funziona bene per scopi ingegneristici, anche per angoli di incidenza più grandi.

Per illustrare il metodo, consideriamo un **esperimento svolto da ricercatori dell'Università di Twente** [10] in cui si utilizzano due sorgenti sonore (**A** e **B**) che incidono su una porta formata da superfici riflettenti alternate a superfici assorbenti, come illustrato nella figura seguente (Fig. 16).

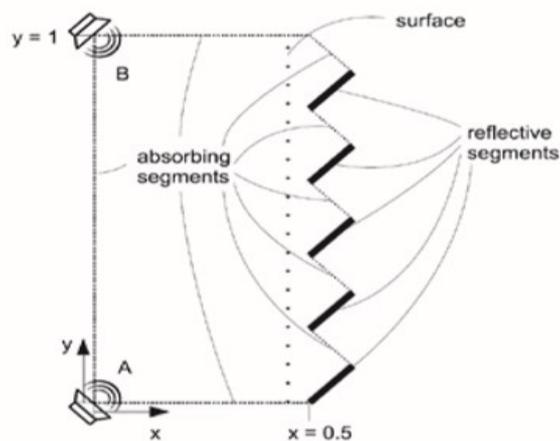


Fig. 16

Nel primo caso, una sorgente sonora omnidirezionale è posizionata in corrispondenza di **A**: poiché la maggior parte dei “raggi” sonori emessi dalla sorgente **A** impattano normalmente sui segmenti assorbenti, ci si aspetterebbe che la porta assorba efficacemente il suono emesso dalla sorgente **A**. Nel secondo caso, posizioniamo la fonte in **B**: poiché in questa ipotesi la maggior parte dei “raggi” sonori incidono normalmente su segmenti riflettenti, ci si attenderebbe meno assorbimento.

Dai grafici elaborati dai ricercatori universitari, emerge inoltre che il coefficiente di assorbimento si riduce significativamente se la sorgente sonora è in **B**, mentre è vicina all'unità se la fonte è in **A**.

Sulla base di questo studio teorico, si può concludere che è possibile misurare, con buoni risultati, i coefficienti di assorbimento sonoro in loco, senza conoscere la fonte sonora, con il semplice utilizzo di una sonda di intensità.

### 3.5.2 Il metodo LSPW (Local Specular Method) e il metodo LAPW (Local Arbitrary Method)

E' stato dimostrato che all'aumentare dell'angolo di incidenza diminuisce l'accuratezza del metodo LPW. Per correggere questa criticità, il metodo LPW è stato ampliato con metodi aggiuntivi, ovvero il **metodo speculare locale (Local Specular Method - LSPW)** e il **metodo arbitrario locale (Local Arbitrary Method - LAPW)**.

Nel **metodo LSPW** vengono considerate due onde piane e si presume che l'angolo di emissione dell'onda riflessa sia uguale all'angolo di incidenza (riflessione speculare).

Per il **metodo LAPW**, invece, si presuppone che gli angoli siano indipendenti. Inutile dire che la pressione e la velocità normale delle particelle non sono sufficienti per calcolare tutte le incognite date (quindi una sonda PU non basta). Sono necessarie ulteriori informazioni locali e per questo gli stessi autori dell'esperimento precedente hanno sviluppato un **array cubico aperto di 8 microfoni Mems** per misurare il coefficiente di assorbimento di un seggiolino auto in un grande ufficio. Un altoparlante è stato utilizzato per emettere suono a banda larga a circa 2 m sopra il seggiolino dell'auto (Fig. 17).

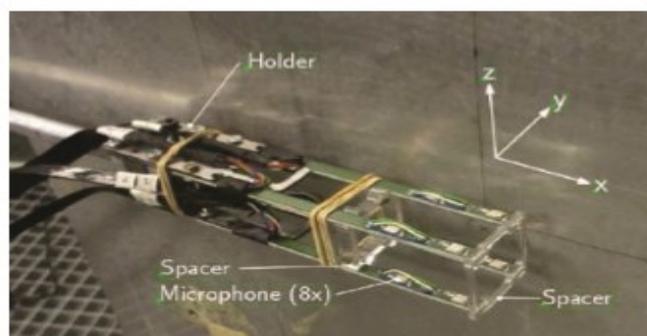


Fig. 17

Dall'esperimento è emerso che il coefficiente di assorbimento complessivo è vicino a 1 ai lati del sedile, quindi su questa posizione abbiamo un buon assorbimento. Si può chiaramente vedere il coefficiente di assorbimento ridotto vicino alle cuciture. Apparentemente, un materiale assorbente compresso e denso provoca un basso coefficiente di assorbimento.

Un'evoluzione di questa tecnologia, l'array cubico con microfoni mems, è costituita dalla **sonda Sonocat** [11], formata da una sfera di alluminio con raggio di 15 mm posta su un piccolo tubo di alluminio. Gli 8 microfoni Mems sono posizionati dietro piccoli fori nella sfera. Sonocat si collega direttamente alla porta USB del computer e, per mezzo del software in dotazione, consente di tracciare in tempo reale il diagramma fra il coefficiente di assorbimento e la frequenza (Fig. 18).



Fig. 18

Il vantaggio di un tale design è la sua robustezza, ma la sfera influisce anche sul campo sonoro locale più di quanto farebbe una struttura aperta. Nonostante ciò, poiché usiamo comunque l'approssimazione dell'onda piana locale, si può facilmente compensare la diffrazione della sfera. In questo modo, possiamo misurare i valori di assorbimento fino a **10 kHz**.

E' stato realizzato un **esperimento** sia con Sonocat che con un tubo ad impedenza e prevede l'utilizzo di due campioni di schiuma di resina di melamminica con uno spessore diverso (5 e 10 cm) [12]. Le misurazioni **con il tubo ad impedenza** sono state eseguite secondo ISO 105342:2008, mentre le misurazioni con **sonda Sonocat** sono state eseguite in una stanza con proprietà anecoiche superiori a 300 Hz per evitare riflessi indesiderati. Una lastra di compensato con uno spessore di circa 1,5 cm viene utilizzata come materiale di supporto e la distanza sfera-superficie  $d$  è di circa 3 cm. Un singolo altoparlante conico è posizionato ad un'altezza di circa 1,5 m sopra il Sonocat emettendo un rumore-bianco a banda larga. Si presume che l'altoparlante sia sufficientemente lontano dalla superficie in modo che le onde sonore emesse siano diventate onde piane superiori a 300 Hz.

Nel complesso si ottiene una buona corrispondenza, fra i risultati ottenuti ed i parametri forniti dal produttore, tra tutte le curve di assorbimento per ogni spessore del materiale. Ciò dimostra che il metodo LPW può essere utilizzato per misurare l'assorbimento sonoro di una superficie sfruttando un array sferico-rigido di microfoni.

### **3.5.3 Il metodo di intensità ed il metodo della funzione di trasferimento a confronto**

Un gruppo di ricercatori italiani [13] ha messo a confronto i due metodi utilizzando molti campioni realizzati con materiali diversi, come gommapiuma, schiuma di poliuretano a celle aperte, intonaci, pastiglie isolanti per vibrazioni (Silmer) e quasi tutto quello che può essere trovato in un laboratorio (lana minerale, fibra di vetro, Armaflex, ecc...). In particolare, il confronto verteva sui possibili errori nei metodi, sulla ripetibilità e riproducibilità, sul loro utilizzo in un'analisi a banda larga o stretta.

L'errore di mancata corrispondenza di fase presente nel metodo della funzione di trasferimento viene solitamente corretto utilizzando la tecnica di calibrazione della commutazione del microfono.

Tale problema esiste anche nel metodo di intensità, perché nell'esperimento non è stata tentata alcuna tecnica di correzione. Questo produce una "intensità residua", che viene misurata anche quando la sonda viene inserita in un campo perfettamente reattivo, senza intensità. Di solito questo aumento di intensità residua alle basse frequenze rappresenta un grave limite quando si effettuano misurazioni del coefficiente di assorbimento del suono a frequenze inferiori a 200 Hz.

Infatti, al di sotto di questa frequenza, l'"intensità residua" prodotta dalla mancata corrispondenza di fase si traduce in un "assorbimento fittizio", che si aggiunge sistematicamente al reale assorbimento del campione (di solito molto basso a queste frequenze). Ciò emerge dai risultati sperimentali dello studio in quanto, a frequenza molto bassa, il coefficiente di assorbimento misurato con l'intensità sonora è sempre leggermente superiore a quello misurato con il metodo di funzione di trasferimento.

La ripetibilità  $r$  è definita come il valore al di sotto del quale ci si può aspettare che la differenza assoluta tra due risultati di test singoli, ottenuti in condizioni di ripetibilità, si trovi con una probabilità del 95%. Una prova viene effettuata in condizioni di ripetibilità quando viene fatta dalla stessa persona, nelle stesse condizioni ambientali, utilizzando la stessa procedura, nello stesso luogo, quasi nello stesso momento, senza estrarre e reintrodurre il campione nel tubo.

La riproducibilità  $R$  è il valore al di sotto del quale la differenza assoluta tra due risultati di un singolo test ottenuti in condizioni di riproducibilità può essere prevista con una probabilità del 95%. Le condizioni di riproducibilità si riferiscono a diversi campioni dello stesso materiale testati in diverse configurazioni strumentali.

I valori di ripetibilità sono inferiori per il metodo della funzione di trasferimento, anche se i valori per le tecniche di intensità sono solo leggermente maggiori, mentre la riproducibilità è quasi la stessa per entrambi i metodi.

In particolare, la riproducibilità  $R$  è di circa un ordine di grandezza maggiore della ripetibilità  $r$ , e questo significa che entrambi questi metodi sono principalmente influenzati da limitazioni di riproducibilità dovute alla superficie limitata del campione e a problemi di taglio e l'errore di ripetibilità è sempre trascurabile rispetto a quello di riproducibilità.

Infine, ma non meno importante, è stato effettuato uno studio dell'influenza della larghezza delle bande di frequenza sui risultati dell'analisi.

Dai risultati teorici e sperimentali, si può concludere che il nuovo metodo di intensità per le misurazioni del coefficiente di assorbimento è semplice, affidabile e presenta alcuni vantaggi significativi rispetto al metodo di funzione di trasferimento standard.

Il Metodo di Intensità funziona bene anche senza utilizzare una coppia di microfoni abbinata a fase, a frequenze superiori a 200 Hz. Per estendere l'intervallo di misurazione verso frequenze più basse è necessaria una coppia di microfoni abbinata a fase o una correzione numerica dei segnali.

Il principale vantaggio del metodo è che non richiede l'analisi a banda stretta (FFT), ma può essere implementato anche con bande di frequenza più ampie: questo dà risultati più utili e riduce il tempo di misurazione riducendo il tempo medio necessario.

#### **4. CONCLUSIONI**

Nei metodi di misura in sito analizzati sono emerse diverse esigenze da soddisfare: la necessità di ottenere risultati attendibili richiede che sia contenuta la presenza di sorgenti spurie e di elementi riflettenti che possono inficiare le misure.

Il soddisfacimento di tali esigenze è stato lo stimolo per giungere a soluzioni innovative, sviluppare nuovi metodi di misura e dispositivi più flessibili. A tal proposito, ho dedicato particolare attenzione alle sonde di intensità PU, una strumentazione piccola, che non predilige una sorgente specifica (a differenza del metodo Adrienne) né un sito specifico com'è emerso negli esperimenti citati nel presente elaborato. La validità di questo strumento è sicuramente il suo utilizzo in svariati siti e per innumerevoli materiali, come ben si è visto dal confronto con il tubo di Kundt utilizzato con il metodo della funzione di trasferimento.

Ritengo che l'innovazione si muoverà sempre di più in tale direzione, ovvero verso la creazione di strumenti in grado di definire il comportamento del suono in ogni sito, che sia una strada o un edificio, in maniera comoda e non ingombrante.

Con l'utilizzo progressivo di questi strumenti sempre più tecnologici, notevole importanza assumerà anche il problema riguardante la loro calibrazione, in quanto fondamentale a garantire il corretto funzionamento della strumentazione.

Tutto questo porterà ad un'analisi specifica in sito delle caratteristiche dei materiali al fine di migliorare il confort acustico degli ambienti di vita quotidiana.

Sono proprio le misurazioni in sito che, a differenza di quelle in laboratorio, permettono di rilevare le proprietà acustiche nelle reali condizioni di installazione e di capire in maniera accurata i problemi acustici insiti nel sito indagato.

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] EN ISO 354:2003 Measurement of sound absorption in a reverberation room.
- [2] UNI ISO 13472-1:2004 Acustica - Misurazione in situ del coefficiente di assorbimento acustico di superfici stradali - Metodo della superficie estesa.
- [3] UNI EN 1793-5:2016 Dispositivi per la riduzione del rumore da traffico stradale - Metodo di prova per la determinazione della prestazione acustica - Parte 5: Caratteristiche intrinseche - Valori in situ della riflessione sonora in condizioni di campo sonoro diretto.
- [4] Massimo Garai, Paolo Guidorzi, Luca Barbaresi, Università di Bologna 2012, Progress in sound reflection measurements on noise barriers in situ.
- [5] UNI EN ISO 10534-1:2001 Acustica - Determinazione del coefficiente di assorbimento acustico e dell'impedenza acustica in tubi di impedenza - Metodo con le onde stazionarie.
- [6] UNI EN ISO 10534-2:2001 Acustica - Determinazione del coefficiente di assorbimento acustico e dell'impedenza acustica in tubi di impedenza - Metodo della funzione di trasferimento.
- [7] ISO 13472-2:2010 Acoustics - Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ Spot method for reflective surfaces.
- [8] E. Brandao; PU probe based in situ impedance measurements of a slotted panel absorber, Atti di ICSV 16; Cracovia, Polonia; 5-9 Luglio 2009.
- [9] J. Grimes, O. Kinnane, R. Wolker, S. Pavia, 2013, In situ measurement of the sound absorption characteristics of existing building fabrics.
- [10] Ysbrand Wijnant, Jen-Hsuan Ho, Niels Consten , Anne de Jong, A novel way to determine sound absorption, sound transmission and sound power.

[11] [www.sonocat.com](http://www.sonocat.com)

[12] 24th International Congress of Sound and Vibration (2017) Niels Consten, Anne de Jong, Ysbrand Wijnant, Application of the local plane wave method to measure in-situ sound absorption using a spherical microphone array.

[13] Angelo Farina, Anna Torelli, Measurement of the sound absorption coefficient materials with a new sound intensity technique.