

REALIZZAZIONE E CALIBRAZIONE DI UNA APPARECCHIATURA PER LA MISURAZIONE DELLA RESISTENZA AL FLUSSO D'ARIA CON IL METODO A FLUSSO ALTERNATO A NORMA UNI EN 29053

Massimo Garai, Francesco Pompoli

D.I.E.N.C.A. Dipartimento di Ingegneria Energetica, Nucleare e del Controllo Ambientale
Università degli Studi di Bologna, V.le Risorgimento 2, 40136 Bologna.

(Ricevuto: dicembre 2000; accettato: settembre 2001)

In questo articolo è descritta la realizzazione di una apparecchiatura per la misurazione della resistenza al flusso d'aria dei materiali porosi e fibrosi di utilizzo acustico. È stato adottato il metodo a flusso alternato, previsto dalla norma UNI EN 29053 ma ancora poco utilizzato dai laboratori che eseguono misurazioni della resistenza al flusso d'aria. Si descrivono le procedure adottate per la calibrazione del sistema, le prove di ripetibilità eseguite per caratterizzare l'incertezza di misura della apparecchiatura ed infine una serie di misurazioni su diversi materiali fonoassorbenti presenti in commercio. Si rileva che nella versione italiana della norma è presente un'imprecisione di traduzione dal testo inglese originale che può indurre in errore nell'applicazione della procedura di calibrazione prevista per il metodo a flusso alternato.

CONSTRUCTION AND CALIBRATION OF AN APPARATUS FOR AIRFLOW RESISTANCE MEASUREMENT BY THE ALTERNATING AIRFLOW METHOD, ACCORDING TO THE UNI EN 29053 STANDARD

This article describes the construction of an apparatus for airflow resistance measurement of porous and fibrous materials for acoustical applications. The apparatus uses the alternating airflow method according to the UNI EN 29053 Standard, which is still rarely used by laboratories performing airflow resistance measurements. The procedures adopted for the calibration of the apparatus are described; moreover, the repeatability tests used to characterise the uncertainty of the measurements are described. Experimental results obtained with different acoustic material are also reported. It is worth noting that a translation mistake present in the Italian version of the UNI EN 29053 Standard can lead to erroneous results when applying the calibration procedure recommended for the alternating airflow method.



1. Introduzione

Nello studio e nella progettazione dei materiali fonoassorbenti porosi e fibrosi ha assunto sempre maggior importanza negli ultimi anni la grandezza denominata *resistenza al flusso d'aria*. Questo parametro fisico da un lato è legato alla struttura meccanica del materiale e dall'altro permette di caratterizzarne il comportamento acustico, attraverso appositi modelli matematici (si vedano per esempio i lavori [1-6]). La resistenza al flusso d'aria e le grandezze da esse derivate sono definite nella norma [7] nel modo seguente (cfr. Fig. 1):

Resistenza al flusso d'aria, R:

$$R = \frac{\Delta p}{Q_v} \quad [\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^3] \quad (1.1)$$

dove: Δp è la differenza di pressione dell'aria, fra le due facce del provino, in Pa;

Q_v è la portata d'aria che attraversa il provino, in m^3/s .

Resistenza specifica al flusso d'aria, R_s :

$$R_s = R \cdot A = \frac{\Delta p}{v} \quad [\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}] \quad (1.2)$$

dove: A è la sezione del provino perpendicolare alla direzione del flusso, in m^2 ;

v è la velocità dell'aria immediatamente prima del provino, in m/s .

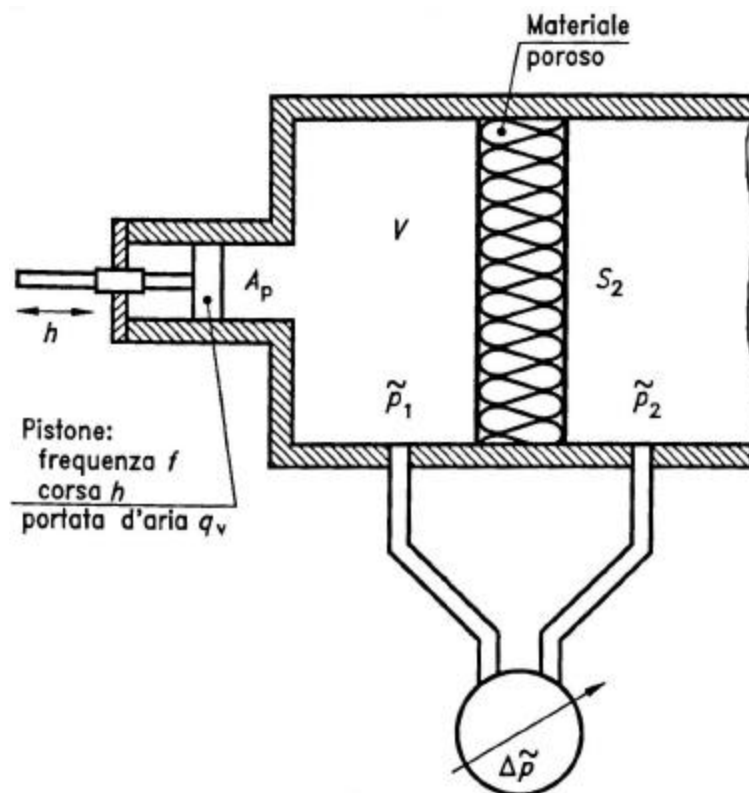


Fig. 1 - Principio di funzionamento del metodo con flusso d'aria alternato (da [1]).

Resistività al flusso d'aria, r (anche indicata con il simbolo σ in molti studi teorici):

$$r = \frac{R_s}{d} = \frac{\Delta p}{v \cdot d} \quad [\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^2] \quad (1.3)$$

dove: d è lo spessore del provino, in m.

Per misurare la resistenza al flusso, si fa riferimento alla sua definizione: la misurazione, infatti, consiste essenzialmente nella valutazione della caduta di pressione che si verifica tra le due facce del provino quando questo viene attraversato da una portata di aria nota. La difficoltà principale si incontra nella misurazione di queste due grandezze a causa della bassa velocità di attraversamento dell'aria prescritta dalla norma (0.5 mm/s) e della conseguente bassa differenza di pressione.

Questi valori di velocità sono necessari per porre il provino nelle stesse condizioni in cui si viene a trovare in opera quando viene attraversato da un'onda sonora e corrispondono ad un regime laminare all'interno dei pori; la perdita di carico dovuta alla dissipazione energetica per attrito subita dal flusso d'aria nell'attraversamento del provino è evidentemente legata alla dissipazione dell'energia acustica nel materiale, e quindi al suo assorbimento acustico.

La norma [7] prevede due metodi per la misurazione della resistenza al flusso: il primo è il metodo a flusso d'aria continuo (metodo A), realizzato solitamente con sistemi a svuotamento che

provocano un flusso a velocità costante che attraversa il campione in prova; una lettura della differenza di pressione ai capi del provino consente di determinare la resistenza al flusso d'aria [7, 9, 10, 11]. Il secondo metodo, utilizzato per realizzare l'apparecchiatura oggetto del presente articolo, viene definito a flusso alternato (metodo B). Questo metodo è stato proposto per la prima volta da Wöhle e Weber nel 1959 [13] ed è caratterizzato da un flusso d'aria con andamento nel tempo sinusoidale con frequenza di oscillazione pari a 2 Hz; in tal caso è possibile calcolare la resistenza al flusso d'aria riferendosi ai valori *efficaci* di velocità del flusso e differenza di pressione, quest'ultima misurata con strumentazione di tipo acustico.

2. Descrizione dell'apparecchiatura di misura

L'apparecchiatura di misura, il cui schema di principio è riportato in Fig. 1, è essenzialmente costituita da:

- cella di misurazione in materiale acrilico, di forma cilindrica con diametro interno di 100 mm e spessore 10 mm, costituita da due parti a incastro, di cui una fissa e una smontabile per l'installazione e il corretto posizionamento del provino; quest'ultimo è verificabile anche visivamente grazie alla parziale trasparenza del materiale utilizzato;
- dispositivo per la produzione del flusso d'aria alternato, costituito da un pistone di diametro pari

- a 20 mm azionato con legge di moto sinusoidale da un sistema camma eccentrica-piattello, posto in rotazione a 2 Hz da un motoriduttore CC; il sistema genera un flusso d'aria noto ed elimina quindi la necessità di misurarne la velocità; tramite quattro camme ad eccentricità crescente è possibile eseguire misurazioni a diverse velocità di flusso: oltre al valore di 0.5 mm/s previsto dalla norma, sono possibili i valori di 1 mm/s, 2 mm/s e 4 mm/s;
- dispositivo di misurazione della pressione efficace, costituito da un microfono da $\frac{1}{2}$ B&K 4181 (frequenza limite inferiore pari a 0.14 Hz) posto in una sede affacciata alla camera di misura e da un analizzatore di spettro FFT LD 3200;
- dispositivo di misurazione dello spessore del campione in prova installato nella sede prevista, costituito da un contropiatto di riferimento, una vite senza fine ed un sistema di lettura con risoluzione di 0.5 mm.

La scelta di realizzare una apparecchiatura a flusso alternato è stata preceduta da un approfondito studio di fattibilità che ha individuato diversi vantaggi derivanti dall'adozione di tale metodo; tali aspetti sono poi stati effettivamente confermati dalle prove eseguite sull'apparecchiatura e sono di seguito brevemente riportati:

- utilizzo per la misurazione della pressione sonora di strumentazione comunemente disponibile in un laboratorio di acustica;
- campo di misurazione della pressione sonora molto elevato e soprattutto con limite inferiore molto basso, minore di almeno un ordine di grandezza rispetto al limite fissato dalla norma (0.1 Pa);
- assenza di un sistema di misurazione della portata o della velocità del flusso d'aria, molto delicato per i sistemi a flusso continuo a causa dei bassi valori presenti (0.5 mm/s);
- possibilità di eseguire la misurazione in automatico mediandola anche per un lungo intervallo di tempo;
- sistema di generazione del flusso d'aria completamente meccanico, robusto ed affidabile;
- possibilità di calibrare il sistema tramite chiusura ermetica di un volume noto e misurazione della compressione adiabatica dell'aria interna [7]; questo aspetto, possibile solo con il metodo a flusso alternato, verrà approfondito nel seguito ed è a parere di chi scrive fondamentale per l'affidabilità della misurazione.

In Fig. 2 viene riportata una fotografia della apparecchiatura realizzata presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Ferrara in collaborazione con il D.I.E.N.C.A. dell'Università di Bologna.

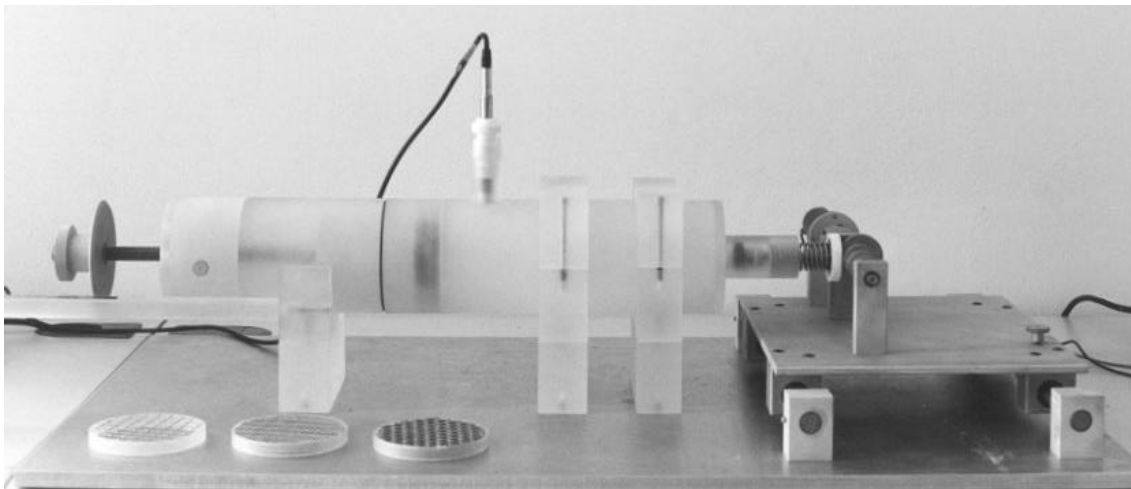


Fig. 2 - Apparecchiatura per la misurazione della resistenza al flusso d'aria realizzata presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Ferrara in collaborazione con il DIENCA dell'Università di Bologna

Sulla base dell'esperienza acquisita con la realizzazione del prototipo di apparecchiatura qui descritto, è stata successivamente sviluppata, in collaborazione con una ditta di strumentazione acustica, un'apparecchiatura analoga per la commercializzazione.

3. Calibrazione dell'apparecchiatura

Una volta realizzata l'apparecchiatura, è stato affrontato il problema della sua calibrazione. Come già accennato, la normativa [7] non prevede per il

metodo in continua nessun tipo di calibrazione, mentre per il metodo in alternata è prevista una prova specifica; il principio fisico su cui si basa è legato al fatto che, isolando un volume noto di aria all'interno della camera di misura e azionando il pistone con corsa nota si ottiene a 2 Hz una compressione-rarefazione del fluido di tipo adiabatico ed è quindi possibile calcolare in via teorica il livello di pressione efficace p_{eff} indotto nella camera:

$$p_{eff} = \kappa \cdot \frac{p_o}{\sqrt{2}} \cdot \frac{V_{PK}}{V} \quad [\text{Pa}] \quad (3.1)$$

dove: p_0 è la pressione atmosferica, in Pa;
 $\kappa = 1,4$ è il rapporto c_p/c_v per l'aria;
 V_{PK} è il prodotto della ampiezza dello spostamento del pistone moltiplicato per la sua sezione, in m^3 ;
 V è il volume della camera di prova, in m^3 .
 Per una compressione adiabatica si ha infatti:

$$p \cdot v^\kappa = \text{costante} \quad (3.2)$$

e derivando:

$$v \cdot dp + \kappa p \cdot dv = 0 \quad (3.3)$$

Per approssimazione alle differenze finite (accettabile essendo: $V \gg V_{PK}$ e $p_0 \gg p_{max} - p_0$, dove p_{max} è la massima pressione ottenuta all'interno della camera di misura durante la calibrazione) si ottiene infine:

$$V \cdot (p_{max} - p_0) - \kappa p_0 \cdot V_{PK} = 0 \quad (3.4)$$

da cui:

$$(p_{max} - p_0) = \kappa \cdot \frac{p_0 \cdot V_{PK}}{V} \quad (3.5)$$

dalla quale si giunge all'espressione (3.1) per definizione di valore efficace di un'oscillazione sinusoidale.

In questa fase si è riscontrata nella norma [7] una imprecisione terminologica di rilevanza fondamentale: il termine V_{PK} viene infatti descritto nella versione italiana come prodotto tra *corsa* e sezione, mentre il testo inglese di provenienza (ISO 9053, rif. [8]) contiene il termine *amplitude*, correttamente riferito alla sola ampiezza (metà quindi della corsa). In sostanza, lo scambio tra i due termini comporta una taratura assoluta del sistema con un fattore 2 di

differenza per la pressione sonora e quindi una sovrastima di ben 6 dB del livello di pressione sonora.

Una volta individuato ed eliminato questo errore, rimane comunque da osservare che la procedura di taratura sopra descritta comporta l'immissione nella formula di misure meccaniche affette da incertezze sperimentali, quali l'ampiezza dell'oscillazione del pistone, il suo diametro e il volume della camera di prova; la misurazione sicuramente più delicata è quella dello spostamento del pistone, in quanto la corsa minima nominale (corrispondente ad una velocità di 0.5 mm/s) è dell'ordine dei 2.81 mm. Per ridurre l'incertezza, una volta calettate a freddo le camme sull'albero, si è proceduto ad una misurazione diretta dell'eccentricità delle camme tramite comparatore centesimale e, per sicurezza si è poi verificato anche direttamente lo spostamento del pistone con un trasduttore di posizione laser inserito nella cella di misurazione.

Grazie alle quattro camme è inoltre possibile eseguire un controllo differenziale delle eccentricità basato sulle differenze riscontrate tra i livelli di pressione misurati in calibrazione con le diverse portate d'aria: in base ai dati di progetto, infatti, si dovrebbe riscontrare un aumento lineare dei valori di Δp rispetto ai valori di eccentricità. In Fig. 3 vengono presentati i risultati delle misurazioni eseguite, confrontate con la regressione lineare passante per l'origine: come si può vedere, anche questa verifica ha portato a risultati decisamente soddisfacenti.

Durante la fase di calibrazione il volume di $2.79 \cdot 10^{-3} m^3$ viene ermeticamente chiuso tramite un coperchio munito di guarnizione di tenuta. Il livello di pressione sonora efficace raggiunta all'interno della camera varia, a seconda della camma utilizzata, tra i 116 dB ed i 136 dB.

Calibrazione

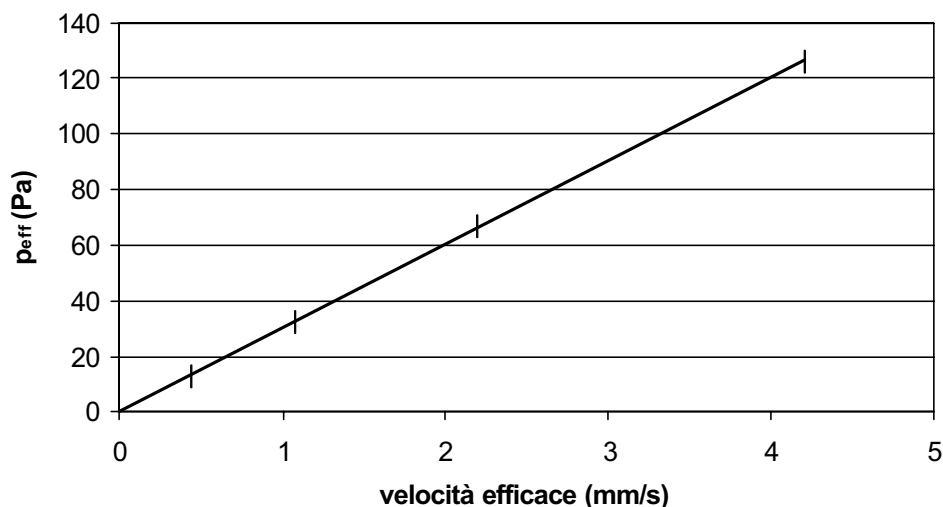


Fig. 3 - Risultati della operazione di calibrazione del sistema con quattro diverse velocità del flusso d'aria (rombi) e andamento teorico (linea continua).

4. Ripetibilità delle misure

Una volta calibrato il sistema si è ritenuto opportuno procedere inizialmente ad una stima della ripetibilità delle misure attraverso una valutazione dello scarto tipo e dell'errore percentuale di una serie di misure ottenute nelle stesse condizioni di prova.

Per valutare la ripetibilità si è dovuto innanzitutto stabilire quali operazioni considerare incluse nella misurazione stessa: la procedura prevede infatti di tagliare un provino di 100 mm di diametro da un pannello di materiale, di montarlo sul portaprovino, di avviare l'albero a camme e di eseguire la misurazione mediata su un certo periodo di tempo. Le variabili che influiscono sulla ripetibilità, ad esclusione di quelle imputabili alla macchina, sono almeno le seguenti:

- disuniformità del materiale in uno stesso pannello;
- taglio del provino;
- montaggio del provino.

In effetti, il taglio ed il montaggio del provino sono indicati in letteratura come i due elementi più delicati per questo tipo di misurazione. Per il taglio infatti si possono riscontrare due tipi di inconvenienti tra i quali è spesso necessario scegliere: se il provino viene tagliato con un diametro superiore a quello dell'alloggiamento si avrà una compressione del materiale con conseguente alterazione delle dimensioni dei pori rispetto alle condizioni di utilizzo in opera e quindi del valore di resistenza al flusso (che ovviamente aumenta al diminuire del diametro medio dei pori); se invece il diametro di taglio è leggermente minore, i trafiletti dovuti alla imperfetta aderenza tra parete e materiale portano ad un errore opposto, generalmente più evidente del precedente; per questo motivo la norma [7] prescrive di tagliare i provini con un diametro leggermente maggiore (nel presente caso 102 mm invece di 100 mm), nei limiti di precisione imposti dal tipo di materiale, spesso difficilmente tagliabile e con struttura non rigida.

Anche per quanto riguarda il montaggio i problemi possono essere notevoli, soprattutto per materiali

molto soffici o stratificati, come lane di vetro o fibre di poliestere non compresse durante il processo produttivo. In questo caso, infatti, al momento del montaggio l'attrito generato dal contatto tra parete laterale e provino genera una compressione assiale del provino stesso che provoca un errore rilevante sulla misura dello spessore, oltre che ad una alterazione delle caratteristiche fisiche dei pori e quindi della resistenza al flusso.

Tale errore può essere per alcuni materiali anche del 10%, per cui si è dovuta adottare una metodologia di prova diversa da quella inizialmente progettata: invece di utilizzare il sistema di misura dello spessore come sistema di acquisizione, si è preferito utilizzarlo come strumento di verifica, facendo preliminarmente una misurazione dello spessore del provino libero per poi effettuare il montaggio gradualmente fino ad ottenere uno spessore analogo anche in condizioni di prova.

In questo modo si è dunque limitata l'influenza dello spessore di montaggio sulla misurazione di resistenza al flusso.

In conclusione, per valutare la ripetibilità delle misure sono state effettuate due serie di misurazioni con modalità diverse:

- una prima serie di otto misurazioni eseguite su un solo provino di melammina (materiale 1) montato ogni volta, verificando il corretto spessore di montaggio, allo scopo di valutare l'influenza del montaggio stesso;
- una seconda serie eseguita su otto diversi provini dello stesso materiale, allo scopo di valutare anche l'influenza del taglio; in questo ultimo caso la stima viene però inevitabilmente influenzata anche dalla disuniformità del materiale, che in certi casi può essere notevole.

In Tab. I vengono riportati i risultati ottenuti; si può notare come la ripetibilità delle misure risulti percentualmente molto bassa e quindi il metodo e l'apparecchiatura sicuramente validi.

Tab. I - Risultati delle prove di ripetibilità eseguite su campioni di schiuma melamminica.

	Prove ripetute su di un provino	Prove su otto provini
r medio ($\text{Kg/m}^3\text{s}$)	11545	11529
Scarto tipo di r ($\text{Kg/m}^3\text{s}$)	100	154
Scarto percentuale (%)	0.86	1.34

Non esistendo in letteratura dati di confronto sulla ripetibilità e riproducibilità di una misurazione di questo tipo, è stato successivamente organizzato a livello internazionale un "Inter-Laboratory Test" per la determinazione di questi due parametri; dai risultati finali, già pervenuti ed in via di pubblicazione, si è riscontrata una variazione dell'errore percentuale compreso tra 1% e 10% per la prova su singolo campione. Si è inoltre potuta valutare con misurazioni su campioni porosi la riproducibilità dei risultati dell'apparecchiatura a flusso alternato di nuova costruzione, i cui valori medi si scostano dell'1.3% rispetto alla media dei risultati per la prova su singolo campione e del 3% per la prova su campioni diversi. Da tali risultati si può dedurre l'ottima ripetibilità delle misure, l'effettiva equivalenza dei metodi a flusso continuo ed alternato (tutti i laboratori coinvolti nell'ILT adottavano il metodo a flusso continuo ad esclusione di quello degli autori del presente articolo) e l'assenza di deviazioni sistematiche.

5. Misure su materiali fibrosi e porosi

Per verificare il comportamento dell'apparecchiatura in diverse condizioni di funzionamento e valutare il campo di valori misurabili della resistività al flusso, si è scelto di effettuare una serie di misurazioni su un insieme di 10 materiali fonoassorbenti in commercio. La scelta di tali materiali è stata fatta tenendo conto di diversi criteri:

- rappresentare i principali tipi di materiali fonoassorbenti (melamina, poliuretano espanso, lana di vetro, lana di roccia, fibre di poliestere);
- eseguire le misurazioni con materiali di diversi spessori e diversa struttura (più o meno rigida);
- valutare materiali con resistenza al flusso molto diversa (per verificare il valore minimo, limitato dal minimo livello di pressione sonora distinguibile dal rumore di fondo).

I materiali scelti sono riportati nella Tab. II, unitamente al loro spessore e alla densità apparente, calcolata dividendo la massa per il volume apparente del provino.

Tab. II - Caratteristiche fisiche dei materiali fibrosi e porosi provati e risultati delle misurazioni di resistenza al flusso d'aria.

Campione	Materiale	Spessore (mm)	Densità apparente (kg/m ³)	Δp (Pa)	R (Ns/m ⁵)	r (Ns/m ⁴)
1	Melamina	20	19	0.101	29357	11523
2	Melamina	50	14	0.209	60633	9519
3	Lana di vetro	50	30	0.344	99474	15617
4	Lana di vetro	45	21	0.170	49284	8597
5	Lana di roccia	50	55	0.640	185228	29081
6	Poliuretano espanso	24	30	0.043	12380	4049
7	Feltro	15	73	0.118	34096	17844
8	Fibra di poliestere	42	12,5	0.020	5790	1082
9	Fibra di poliestere	25	40	0.058	16893	5304
10	Fibra di poliestere	50	76	0.230	66483	10438

Di ogni materiale è stata valutata la densità apparente, misurato lo spessore, tagliato un provino cilindrico di materiale di circa 102 mm di diametro, montato accuratamente il provino stesso (verificando il corretto montaggio con la misura dello spessore sull'apparecchiatura) ed eseguita la misurazione di resistività al flusso con velocità efficace dell'aria di 0.5 mm/s.

Nella tabella sono inoltre riportati i risultati sperimentali ottenuti nelle condizioni operative sopra descritte per i 10 materiali scelti. Come si vede il limite inferiore di misura per i campioni scelti è stato di 0.02 Pa (campione n. 8). Il limite inferiore dipende non tanto dalla sensibilità della strumentazione, almeno di due ordini di grandezza inferiore, ma piuttosto dal rumore di fondo presente nel laboratorio a 2 Hz.

Un ultimo aspetto che è stato investigato è la presunta indipendenza dalla velocità della resistenza al flusso nel campo di velocità di interesse; in teoria infatti all'interno dei pori si dovrebbe avere, per basse velocità di flusso ed elevate porosità del materiale, un moto laminare che provoca una caduta di pressione lineare con la velocità del flusso e quindi una invarianza della resistenza al flusso e delle grandezze derivate [7, 9, 14]. In tutti i casi si è effettivamente trovata una buona correlazione dei risultati ottenuti alle quattro velocità a cui la macchina può funzionare, come illustrato nelle Fig. 4 e 5.

Per tutti i materiali provati si può dunque concludere che il moto all'interno dei pori è laminare per velocità inferiori o uguali a 4 mm/s.

2-Melammina

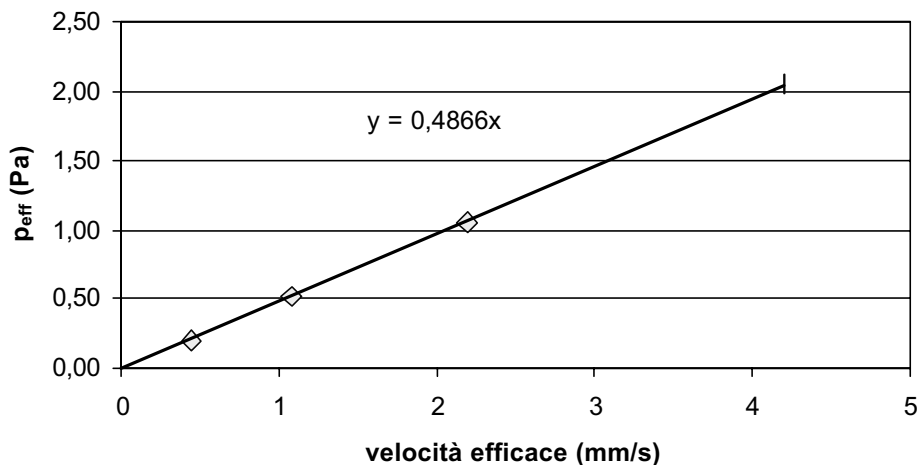


Fig. 4 - Valori di differenza di pressione rilevati ai capi del campione 2 (schiuma melamminica) in funzione della velocità (rombi) e andamento della retta di regressione lineare passante per l'origine (linea continua)

2-Melammina

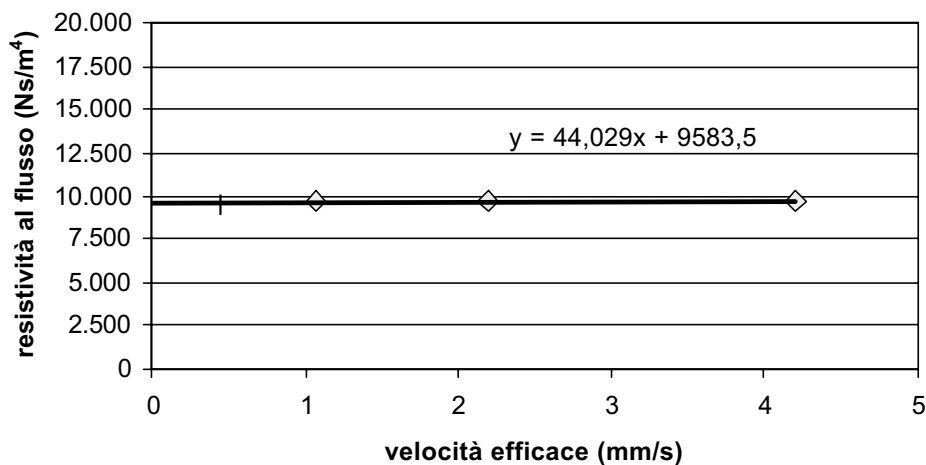


Fig. 5 - Valori di resistività al flusso misurati per il campione 2 (schiuma melamminica) in funzione della velocità (rombi) e andamento della retta di regressione lineare (linea continua); si noti che il coefficiente angolare della retta è pressoché nullo ($4,6 \cdot 10^{-3}$ (Ns/m⁴)/(mm/s))

6. Conclusioni

Con il presente lavoro si è inteso illustrare le problematiche che la realizzazione di una apparecchiatura per la misurazione della resistenza al flusso d'aria a norma UNI EN 29053:1993 [7] comporta: soprattutto la fase di calibrazione è risultata molto delicata a causa dell'imprecisione terminologica presente nella versione italiana della norma e della difficile rilevazione sperimentale della corsa del dispositivo di generazione del flusso. Sono inoltre stati messi in luce gli aspetti positivi legati al metodo a flusso d'aria alternato, al momento poco utilizzato, ed infine sono state illustrate le prove di ripetibilità e le misurazioni eseguite su una serie di materiali fibrosi e porosi di uso comune.

Bibliografia

- [1] Strutt J.W., Lord Rayleigh (1945), *Theory of sound*, Dover, New York (re-issue of the 1877 Ed.).
- [2] Zwikker C., Kosten C.W. (1949), *Sound absorbing materials*, Elsevier, Amsterdam.
- [3] Biot M.A. (1962), *Generalized theory of acoustic propagation in porous dissipative media*, J. Acoust. Soc. Am., 34, 1254-1264.
- [4] Morse P.M., Ingard K.U. (1968), *Theoretical acoustics*, McGraw-Hill, New York.
- [5] Delany M.E., Bazley E.N. (1970), *Acoustical properties of fibrous materials*, Appl. Acoust., 3, 105-116.
- [6] Attenborough K. (1982), *Acoustical characteristics of porous materials*, Phys. Rep., 82, 179-227.
- [7] UNI EN 29053:1993, *Acustica-Materiali per applicazioni acustiche-Determinazione della resistenza al flusso d'aria*.
- [8] ISO 9053:1991, *Acoustics-Materials for acoustical applications-Determination of airflow resistance*.
- [9] Brown R.L., Bolt R.H. (1942), *The measurement of flow resistance of porous acoustic materials*, J. Acoust. Soc. Am., 13 (4), 337-344.
- [10] Beranek L.L. (1988), *Noise and vibration control*, Institute of Noise Control Engineering, pp. 246-251.
- [11] Ianniello C., Vigo P. (1982), *Un'apparecchiatura per la misura della resistività dei materiali porosi*, Atti Convegno A.I.A. 1982, 35-37.
- [12] Iannace G., Ianniello C., Maffei L., Romano R. (1999), *Steady-state air-flow and acoustic measurement of the resistivity of loose granular materials*, J. Acoust. Soc. Am., 106 (3), 1416-1419.
- [13] Wöhle W., Weber K. (1959), *Hochfrequ. u. Elektroak.*, 68, p. 158.
- [14] Ianniello C., Vigo P. (1983), *Resistenza al flusso di materiali sinterizzati*, Atti Convegno A.I.A. 1983, 93-95.