

APPARECCHIATURA PER LA MISURA DELLA POROSITA' DI MATERIALI A CELLA APERTA

Francesco Pompoli, Paolo Bonfiglio

Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Ferrara

1. Introduzione

La struttura dei materiali porosi e fibrosi può essere descritta da diversi parametri che vengono inoltre correlati alle prestazioni acustiche attraverso diverse tipologie di modelli matematici. Tra questi parametri, definiti da numerosi autori, la porosità riveste un ruolo fondamentale per la teoria di propagazione del suono nei mezzi porosi.

La porosità viene definita come rapporto tra l'aria contenuta in un materiale (esclusivamente nelle celle aperte interconnesse tra loro e con l'esterno) ed il volume complessivo del materiale stesso.

Diversi metodi sono descritti in letteratura per la misura di tale parametro, ed essi si distinguono principalmente per il mezzo utilizzato per saturare i pori del materiale (aria o acqua, solitamente) e per il metodo di calcolo del volume di aria interno al campione (diretto o indiretto); nel presente lavoro, dopo una breve descrizione dei metodi di letteratura, verrà descritta la realizzazione di un sistema di misura della porosità e saranno discussi i risultati sperimentali con essa ottenuti.

2. Apparato di misura sperimentale

2.1 Metodi di misura di letteratura

I metodi di misura descritti in letteratura sono essenzialmente:

a) misura del volume di acqua contenuto nei pori saturati, attraverso la misura della variazione di volume in un recipiente nel quale è immerso il campione, oppure attraverso la pesatura di un campione asciutto e saturo di acqua, estratto velocemente dal recipiente;

b) misura del peso di un campione in aria e calcolo del peso della sua struttura a partire dalla densità del materiale che costituisce la struttura stessa;

c) misura del peso di un campione in aria e sottoposto a vuoto, che consente la determinazione del volume d'aria presente nei pori attraverso la differenza di peso rilevata [1];

d) misura del volume della struttura del campione attraverso una compressione a volume noto ed in condizioni isoterme di un volume d'aria isolato nel quale è immerso il campione [2], [3].

Tra tutti i metodi, sono stati esclusi quelli che richiedono la saturazione del materiale con acqua, in quanto da alcune prove preliminari si è potuto constatare che risulta difficile la saturazione completa di tutti i pori, soprattutto con materiali espansi le cui celle sono collegate all'esterno da percorsi piuttosto tortuosi e presentano canali ciechi. L'impossibilità di sapere se e quando nel materiale tutta l'aria è stata effettivamente sostituita da acqua determina nel metodo incertezza e sistematica sottostima della porosità effettiva.

Tra i metodi che prevedono la misura in aria, è stato scelto quello che prevede una compressione di volume noto in quanto non necessita di sistemi meccanici aggiuntivi (pompa a vuoto) e prevede la semplice misura di pressione attraverso idoneo trasduttore.

2.2 Principio di misura dell'apparato

Il sistema di misura si basa sulla legge di stato dei gas perfetti a temperatura costante (legge di Boyle):

$$(1) \quad P \cdot V = \text{costante} \quad [\text{Nm}]$$

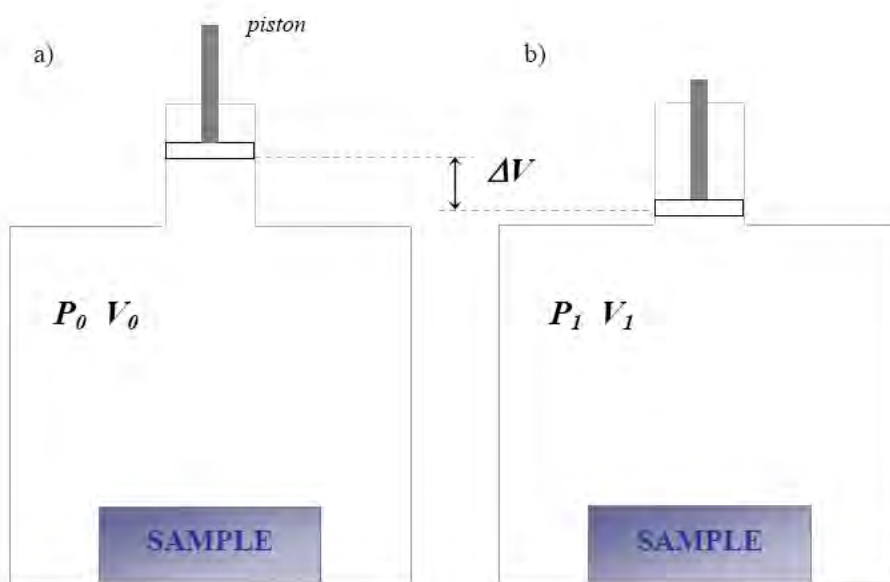


Figura 1 – Principio di misura del porosimetro

Nel caso in esame, illustrato in figura 1, dato un recipiente contenente il materiale poroso, con pressione interna P_0 e volume V_0 , se sottoponiamo il sistema a compressione isoterma con variazione di volume noto ΔV , otteniamo una pressione P_1 data da:

$$(2) \quad P_1 = \frac{P_0 \cdot V_0}{V_0 - \Delta V} \quad [\text{Pa}]$$

Dalla misura di P_1 e P_0 è pertanto possibile, noto ΔV , determinare il volume iniziale V_0 presente nel recipiente occupato dal campione; da esso, noto il volume complessivo del recipiente, si determina il volume V_m occupato dalla struttura del materiale e la porosità dello stesso attraverso la:

$$(3) \quad \Omega = \frac{V_{\text{aria}}}{V_{\text{campione}}} = 1 - \frac{V_m}{V_{\text{campione}}} \quad [-]$$

2.3 Descrizione dell'apparato

L'apparecchiatura è stata ideata e realizzata presso il Laboratorio di Acustica del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Ferrara. Essa consiste essenzialmente in un recipiente con coperchio a tenuta, di diametro pari a 102 mm, collegato attraverso un piccolo foro ad un cilindro contenente un pistone per impiego pneumatico.

Il pistone viene azionato manualmente tramite una manovella collegata ad una vite senza fine con corsa nota, pari a 25 mm.

Sul coperchio della camera di prova è posizionato un trasduttore di pressione differenziale di elevata precisione, con un *range* di 175 mbar ed una linearità e isteresi max pari a $\pm 0,004\%$. Il sistema è inoltre equipaggiato con un trasduttore di pressione assoluta esterno per rilevare la pressione atmosferica e calcolare così le pressioni assolute interne alla camera.

In figura 2 sono illustrati alcuni particolari della apparecchiatura.

L'acquisizione dei segnali di pressione assoluta e differenziale viene effettuata da segnali in tensione 0-5 Volt attraverso la scheda NI PCI 6120 collegata ad un PC; in ambiente Labview® è stato sviluppato un software che consente di campionare ad intervalli variabili (tipicamente 5 volte al secondo) il valore a frequenza nulla dell'FFT del segnale in ingresso, in modo da ottenere un segnale più stabile con rumore di fondo ridotto.

2.4 Calibrazione del sistema

Attraverso una misura a vuoto del sistema è possibile calcolare il volume effettivo della camera interna; attraverso la relazione (2) è possibile infatti ricavare V_{eff} dalla misura di P_1 e P_0 :

$$(4) \quad V_{\text{eff}} = \frac{P_1}{P_1 - P_0} \cdot \Delta V \quad [\text{m}^3]$$

La determinazione del volume effettivo a vuoto, fondamentale per le misure successive, è stata ripetuta 6 volte per ottenere un valor medio e la relativa deviazione

standard; nella configurazione descritta il volume effettivo è risultato pari a 848281 mm^3 con una deviazione standard assoluta di 227 mm^3 (0,03% rispetto al valor medio).

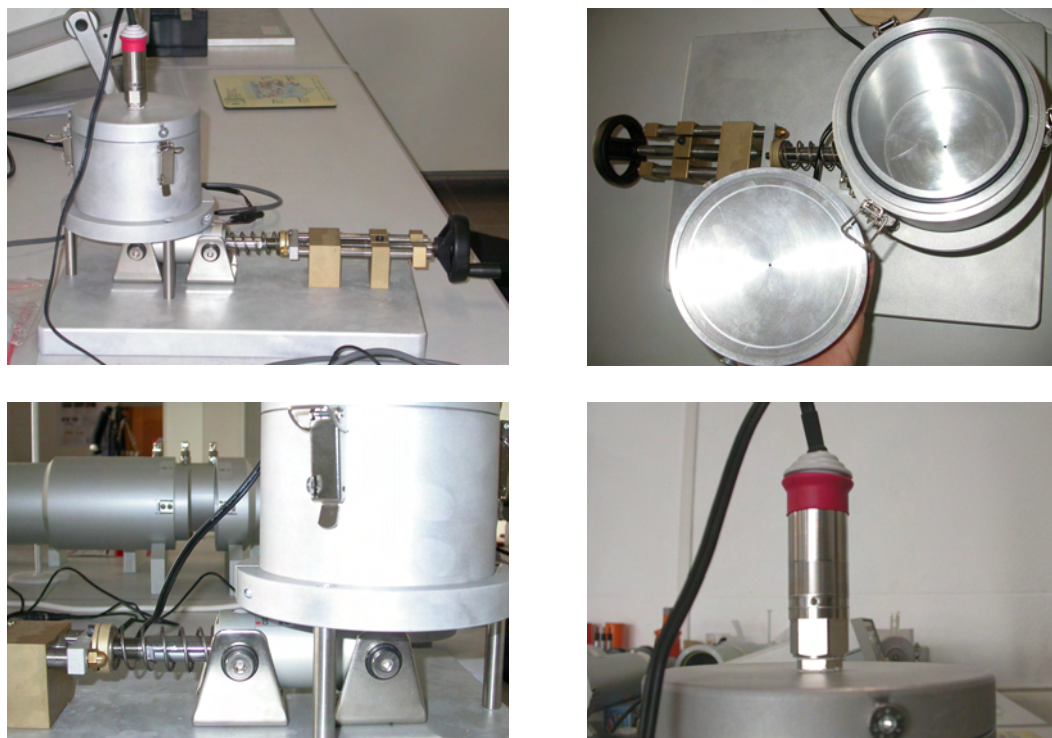


Figura 2 – Particolari della apparecchiatura di misura

In figura 3 viene riportato l'andamento della pressione interna al recipiente durante la misura: si può notare una compressione a gradino, scelta per controllare manualmente la velocità del pistone e per avere una serie di stadi che si avvicinino il più possibile ad una compressione isoterma del volume d'aria. Dopo prove preliminari, la velocità scelta è stata di compressioni successive di 2 mm di corsa in 15 secondi e pause di 10 secondi per stabilizzare il sistema, per un totale di circa 5 minuti di durata della fase di compressione.

Dalla figura 3 si può notare come, al termine della compressione, vi sia una diminuzione di pressione dovuta ad un comportamento non perfettamente isoterma del fluido; esso risulta infatti riscaldato durante la compressione ed al suo termine l'aria cede calore al recipiente in alluminio fino a raggiungere di nuovo equilibrio termico. La determinazione della pressione finale P_1 viene fatta al raggiungimento di tale equilibrio, trascurando le perdite energetiche verificatesi nel sistema.

Per testare la linearità del sistema nella misura di volumi noti, sono stati realizzati quattro cilindri di acciaio di uguale diametro e lunghezza. Dalla misura dei volumi eseguita con l'apparecchiatura si può notare, in figura 4, come il sistema abbia una buona precisione e linearità rispetto ai valori teorici.

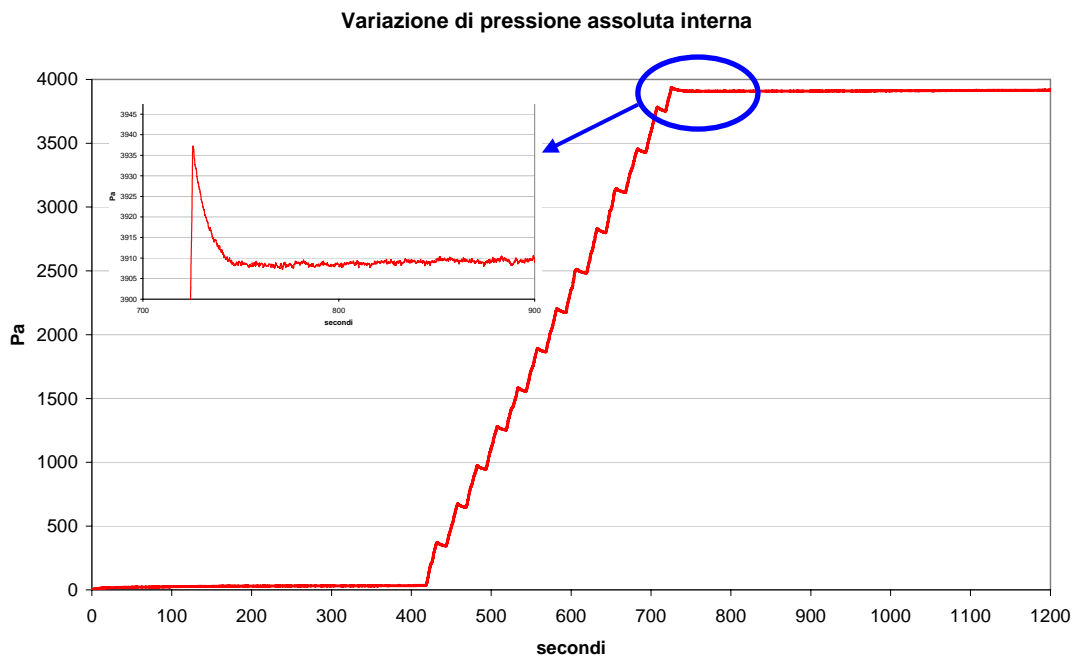


Figura 3- Variazione della pressione assoluta all'interno del recipiente in pressione: i valori sono ottenuti sommando la pressione differenziale con la pressione atmosferica esterna e calcolando la variazione rispetto alla pressione assoluta iniziale.

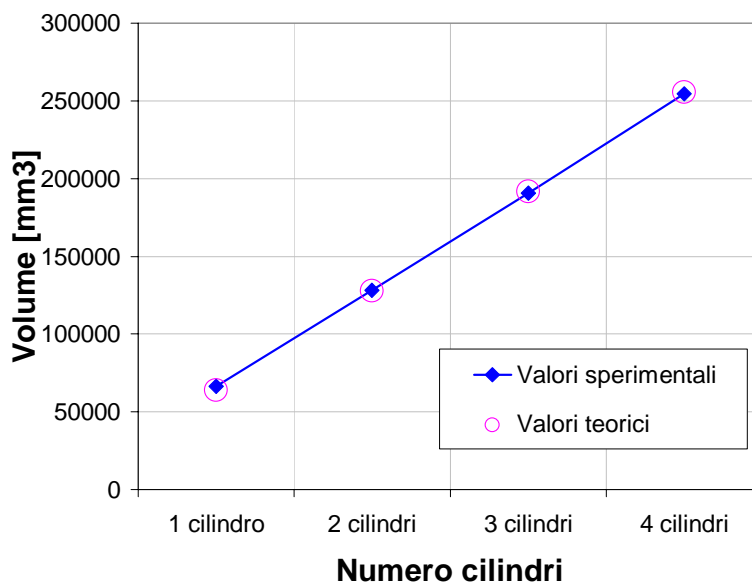


Figura 4 – Confronto tra valori teorici e misurati di volumi noti.

3. Misure di porosità su materiali fonoassorbenti

Per testare l'apparecchiatura di misura, sono state eseguite prove su numerose tipologie di materiali fonoassorbenti; su campioni di melammina sono inizialmente state

eseguite misure per valutare la ripetibilità, anche al variare del volume di materiale inserito nella camera.

Dalla tabella 1 si può notare come per un campione di melammina (porosità superiore a 0,99) il valor medio risulti leggermente superiore a 1 (1,025), con una deviazione standard molto contenuta (0,009). Inserendo nella camera 4 campioni di melammina, si può notare come il valor medio scenda a 1,003 e la deviazione standard diminuisce a 0,003.

Tabella 1 – Risultati sperimentali per prove ripetute sullo stesso campione.

	<i>1 campione di melammina</i>	<i>4 campioni di melammina</i>
1	1,031	1,002
2	1,026	0,998
3	1,030	1,001
4	1,034	1,005
5	1,015	1,006
6	1,012	1,006
Media	1,025	1,003
Dev. standard	0,009	0,003

I risultati evidenziano che con materiali molto porosi risulta difficile misurare il volume della struttura (inferiore all'1% rispetto al volume del campione) e che la precisione sul valore assoluto (che fisicamente deve essere inferiore a 1) migliora aumentando il volume del campione in prova e quindi della struttura.

Il fatto comunque che con un campione il valore di porosità risulti sistematicamente superiore all'unità non può essere interpretato esclusivamente come effetto della difficoltà di misura di volumi di struttura eccessivamente piccoli, in quanto come si è visto la ripetibilità è comunque ottima. Appare quindi un comportamento sistematico dovuto a pressioni P_1 nel caso con melammina sistematicamente inferiori al caso a vuoto, che determina volumi di struttura negativi, come mostrato in figura 5.

Questo fenomeno è stato interpretato come una perdita energetica aggiuntiva che durante la compressione si verifica nell'aria all'interno del campione e che determina una perdita di energia globale maggiore rispetto al caso a vuoto. Una correzione di tale effetto è stata sviluppata eseguendo la calibrazione del sistema (determinazione del volume effettivo descritta nel paragrafo 2.2) con un campione di melammina invece che con la camera vuota. In questo modo, ammettendo nota la porosità della melammina, che il letteratura viene indicata superiore a 0,99 e nel presente studio viene assunta pari a 0,995, è possibile determinare un volume a vuoto del sistema "corretto" dagli effetti termici nel materiale. Tale volume viene successivamente utilizzato per il calcolo della porosità dei materiali, assumendo quindi che in tutti i materiali i fenomeni di dissipazione siano analoghi.

In tabella 2 sono riportati a titolo di esempio i risultati di porosità ottenuti su diverse tipologie di materiali, con il metodo "teorico", ottenuto dall'applicazione della (2) con il V_0 ottenuta dalle prove a vuoto, e con il metodo "corretto" nel quale il volume V_0 è ottenuto dalle prove con un campione di melammina a porosità supposta nota (0,995).

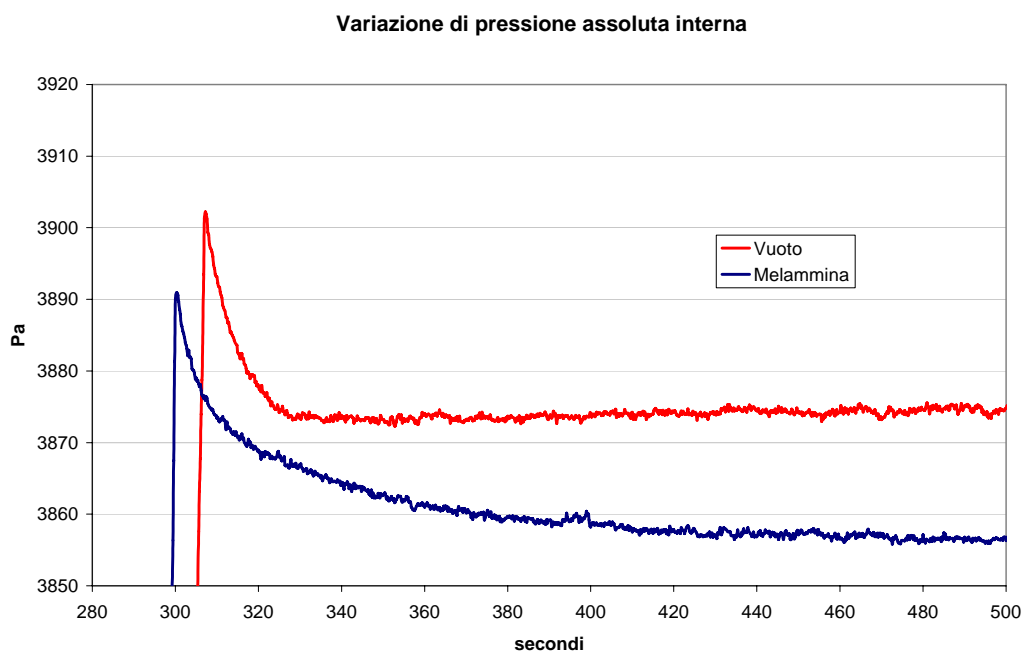


Figura 5 – Confronto dell’andamento della pressione dopo la compressione nel caso di prova a vuoto e di prova con melamina

Tabella 2- Risultati di porosità ottenuti su diverse tipologie di materiali

<i>Materiale</i>	<i>Densità [kg/m3]</i>	<i>Porosità Metodo “teorico”</i>	<i>Porosità Metodo “corretto”</i>
<i>Melamina</i>	10	1,02	0,995
<i>Poliuretano A</i>	30	1,01	0,98
<i>Poliuretano B</i>	25	0,99	0,97
<i>Fibre di poliestere A</i>	40	1,02	0,99
<i>Fibre di poliestere B</i>	60	0,97	0,96
<i>Feltro</i>	80	0,96	0,94
<i>Lana di vetro</i>	15	0,99	0,98
<i>Fibre di canapa</i>	50	0,99	0,98
<i>Elastomero espanso riciclato A</i>	260	0,87	0,85
<i>Elastomero espanso riciclato B</i>	60	0,99	0,98
<i>Schiuma di polietilene</i>	30	0,87	0,87
<i>Intonaco fonoassorbente A</i>	520	0,57	0,54
<i>Intonaco fonoassorbente B</i>	520	0,85	0,82

Come si può notare, i valori ottenuti con i due metodi differiscono al massimo di 0,03 ma il metodo “corretto” consente di ottenere valori sempre inferiori a 1, non solo per la melamina ma anche per altri materiali altamente porosi quali poliuretani e fibre di poliestere.

4. Conclusioni

L'apparecchiatura di misura realizzata ha dimostrato una ottima precisione e ripetibilità nella misura di diverse tipologie di materiali porosi, con una capacità di risoluzione di 0,01 anche per materiali con porosità vicina all'unità.

Alcuni limiti nella approssimazione isoterma della trasformazione sono stati evidenziati e compensati con una calibrazione del sistema attraverso la misura di un campione noto; per una maggiore precisione occorrerebbe misurare anche la temperatura all'interno della camera e valutare la trasformazione politropica. L'incidenza di tali aspetti è comunque molto limitata rispetto alla risoluzione dell'apparecchiatura.

La misura di porosità è utile, oltre che per prevedere le prestazioni acustiche del materiale, anche per la determinazione della rigidità dinamica secondo la norma UNI EN 29052-1 per campioni aventi resistività al flusso compresa tra 10 e 100 kNs/m⁴.

Il sistema è in grado di funzionare anche come barometro, eseguendo la misura del sistema a vuoto e imponendo noto il volume V_0 iniziale (determinato da prove precedenti). Da alcuni confronti fatti tra i risultati ottenuti dalla misura con porosimetro e con il trasduttore di pressione atmosferica, è risultato uno scostamento medio di 80 Pa (0,08 % rispetto al valore della pressione atmosferica di riferimento).

Bibliografia

- [1] Panneton R., Gros E., "A missing mass method to measure the open porosity of porous solids", ACTA Acustica united with Acustica, 19, pp. 342-348 (2005).
- [2] Champoux Y., Stinson M.R., Daigle G.A., "Air-based system for the measurement of porosity", Journal of Acoustical Society of America, 89, pp.910 (1991).
- [3] Beranek L., "Noise and vibration control" , Institute of Noise Control Engineering, 1988.

Ringraziamenti

Lavoro svolto nell'ambito del laboratorio di ricerca e trasferimento tecnologico LAV (Laboratorio di Acustica e Vibrazioni) realizzato con il contributo della Regione Emilia Romagna - Assessorato Attività Produttive, Sviluppo Economico, Piano telematico, PRRIITTT misura 3.4 azione A - Obiettivo 2.

Gli autori ringraziano anche Paolo e Marcello per il fondamentale apporto nella progettazione e messa a punto del dispositivo.